



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad
Morelia

GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE MORELIA Y SUS ÁREAS
NATURALES PROTEGIDAS: UNA PERSPECTIVA DE LA
GEOCONSERVACIÓN

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN GEOCIENCIAS

P R E S E N T A

MIRANDA ROBLES PEREZNEGRÓN

DIRECTOR DE TESIS: DR. PEDRO CORONA CHAVEZ

CODIRECTOR DE TESIS: DR. ANTONIO POLA VILLASEÑOR

MORELIA, MICHOACÁN

MARZO, 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



ESCUELA
NACIONAL
DE ESTUDIOS
SUPERIORES
UNIDAD MORELIA

10
años
(2011-2021)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS SUPERIORES UNIDAD MORELIA
SECRETARÍA GENERAL
SERVICIOS ESCOLARES

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 22-10 del Comité Académico** de la **Licenciatura en Geociencias** de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrado el día **18 de enero de 2023**, se acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional de la alumna **Miranda Robles Pereznegrón** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **417080121**, con el trabajo titulado: **"Geología de la Región de Morelia y sus Áreas Naturales Protegidas: una perspectiva de la Geoconservación"**, bajo la dirección como tutor del **Dr. Pedro Corona Chávez** y como co-tutor el **Dr. Antonio Pola Villaseñor**.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. Gerardo Bocca Verdinelli
Vocal:	Dra. María del Sol Hernández Berna
Secretario:	Dr. Pedro Corona Chávez
Suplente:	M. C. Guillermo Cisneros Máximo
Suplente:	M. C. Daniel Alberto Gómez Calderón

Sin otro particular, queda de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Morelia, Michoacán a 28 de febrero de 2023.

DRA. YUNUEN TAPIA TORRES
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Antigua Catedral o Politécnica NF 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta
56190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)489.3500 y (55)5423.7300. extensión Red UNAM: 80614
www.enssmorelia.unam.mx

Agradecimientos

Agradezco a la Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Morelia, por todo el apoyo y las innumerables oportunidades y experiencias que este espacio brindó para mi formación académica y personal, así como a mis profesores y compañeros geos, por las enseñanzas y los momentos compartidos.

Al departamento de servicios escolares por sus atenciones y sugerencias para concluir este proceso de titulación.

Gracias al M. C. Guillermo Cisneros por facilitar los materiales cartográficos que fueron tan importantes para este trabajo.

Agradezco mucho a la mesa sinodal, Dr. Gerardo Bocco, Dra. María del Sol Hernández, M. C. Alberto Gómez, M. C. Guillermo Cisneros y a mi coasesor Dr. Antonio Pola, por su atención, tiempo y sugerencias para mejorar este trabajo.

Agradezco también a mis compañeros de campo y de tesis Memo, Kache, Itzayana y Beto, por su amistad y apoyo. Por su valiosa compañía y por permitirme aprender de ustedes.

Agradezco al Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra de la UMSNH por haberme brindado un espacio para estudiar y desarrollar mis ideas.

A Karla Serrano, gracias por enseñarme matemáticas como nadie nunca lo había hecho, pero sobre todo por tu amistad y la de tu familia.

Aunque ya no se encuentra físicamente presente, agradezco mucho a Víctor Hugo Garduño por su ejemplo y calidez, por haberme mostrado la magia de la geología estructural y la felicidad de estar en el campo.

A Fer Hernández por siempre motivarme e impulsarme con mucho amor.

Agradezco infinitamente a mi asesor Dr. Pedro Corona por haber guiado este trabajo y mi proceso de formación profesional, no pude haber elegido a un mejor mentor. Gracias por todo el apoyo, la confianza y el cariño.

Dedicatorias

A mi madre, mi padre y mi hermano Javier

A Fer y a Odi

A Pedro Corona Chávez

A la memoria de Víctor Hugo Garduño Monroy

A la música, mi guía

—How deep our sleep last night in the mountain's heart, beneath the trees and stars, hushed by solemn-sounding waterfalls and many small soothing voices in sweet accord whispering peace! And our first pure mountain day, warm, calm, cloudless, —how immeasurable it seems, how serenely wild! I can scarcely remember its beginning. Along the river, over the hills, in the ground, in the sky, spring work is going on with joyful enthusiasm, new life, new beauty, unfolding, unrolling in glorious exuberant extravagance, — new birds in their nests, new winged creatures in the air, and new leaves, new flowers, spreading, shining, rejoicing everywhere.

(John Muir, 1911)

Contenido

Resumen	i
Abstract	ii
I. Introducción	1
II. Generalidades	4
2.1 Localización geográfica, localidades y vías de acceso	4
2.2 Cuencas Hidrográficas	6
2.3 Climas	7
III. Marco geológico de la Región de Morelia	9
3.1 Geología regional de la Región de Morelia	9
3.2 Sucesión volcánica del Oligoceno (?)- Mioceno Tafetán y Sierra de Mil Cumbres	10
3.3. Secuencia fluvio-lacustre de la subcuenca Morelia-Charo	13
3.4 El Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato	15
3.4.1 Primeros estudios	15
3.4.2 Definición	16
3.4.3 Variaciones espaciotemporales del vulcanismo	18
3.4.4 Estructura y agrupación de edificios volcánicos (<i>clustering</i>)	19
3.4.5 Características petrológicas generales	21
3.5 Vulcanismo superior (Mioceno Tardío y Plioceno-Holoceno) de la Región de Morelia	22
IV. Problemáticas geológico-ambientales de la Región de Morelia	30
4.1 La ciudad de Morelia: historia y tendencias de expansión urbana	30
4.2 Ubicación de los tiraderos de basura de Morelia	34
4.3 Procesos de remoción en masa	35
4.4 Riesgos hidrológicos	37
4.5 Las fallas geológicas de Morelia	39
V. Las Áreas Naturales Protegidas de la Región de Morelia	41
5.1 Localización y decreto de las Áreas Naturales Protegidas de la Región de Morelia	41
5.2 Planes de manejo de las Áreas Naturales Protegidas de la Región de Morelia	43
5.3 Planes de desarrollo y cambios de las Áreas Naturales Protegidas de la Región de Morelia	43

VI. Marco teórico: Geoconservación	46
6.1 La geodiversidad y el enfoque biocéntrico de la conservación	46
6.2 La geoconservación y la valoración de la geodiversidad	47
6.3 Inventarios de la geodiversidad para la geoconservación	50
6.4 Geoturismo y geoparques	52
VII. Justificación y objetivos	56
7.1 Justificación	56
7.2 Objetivo general	59
7.3 Objetivos específicos	59
VIII. Metodología y materiales	60
8.1 Revisión bibliográfica	60
8.2 Materiales cartográficos	60
8.3 Revisión cartográfica	61
8.4 Morfología de volcanes	61
8.5 Análisis morfoestructural	62
8.6 Cartografía geológica	63
8.7 Trabajo de campo	63
8.8 Integración	63
IX. Resultados	64
9.1 Clasificación volcánica de la Región de Morelia	64
9.2 Análisis morfoestructural de la Región de Morelia	71
9.2.1 Dominios morfoestructurales de la Región de Morelia	71
9.2.1.1 Sierra y paleo-caldera La Escalera	71
9.2.1.2 Paleo-caldera de Atécuaro	74
9.2.1.3 Sucesión volcánica de Cuitzeo	75
9.2.1.4 Subcuenca Morelia-Charo	78
9.2.1.5 Morelia	79
9.2.1.6 Flujos de La Leonera-Tendeparacua	81
9.2.1.7 Sucesión de domos La Taza-La Nieve	81
9.2.1.8 Picacho-La Trampa	82
9.2.1.9 Sierra del Tzirate	83
9.2.1.10 Volcanes de La Providencia	85
9.2.1.11 Volcanes escudo de Morelia	85
9.2.1.12 Volcanes de Sanambo	87

9.2.1.13 La Alberca	89
9.2.1.14 Conos de Tanimireche	90
9.2.1.15 Mesa volcánica de Rancho Seco	90
9.2.1.16 Mesa volcánica de Morelia	91
9.2.1.17 Volcanes de Pátzcuaro-Tzintzuntzan	92
9.2.1.18 Planicies de la Región de Morelia	93
9.2.2 Sistemas de lineamientos morfoestructurales	96
8.2.2.1 Sistema caldérico E-O	96
8.2.2.2 Sistema NO-SE	97
8.2.2.3 Sistema NE-SO Mil Cumbres	98
8.2.2.4 Sistema E-O Morelia-Acambay	99
9.3 Cartografía y unidades geológicas de la Región de Morelia	101
9.3.1 Unidades geológicas	101
9.3.1.1 Sucesión volcánica Tafetán-Mil Cumbres	101
9.3.1.2 Sistemas caldéricos y secuencias ignimbríticas Morelia-Cuitzeo	105
9.3.1.3 Domos post-caldéricos Atécuaro-Punhuato	108
9.3.1.4 Volcanes y derrames Zapata-La Cruz	109
9.3.1.5 Secuencia fluvio-lacustre Morelia-Charo	110
9.3.1.6 Domos y derrames Leonera-Divisadero	111
9.3.1.7 Conos La Trampa	112
9.3.1.8 Domos y derrames Santa Genoveva	113
9.3.1.9 Escudos Quinceo-Picacho	113
9.3.1.10 Conos y derrames Pelón	113
9.3.1.11 Depósitos piroclásticos El Porvenir	114
9.3.1.12 Domos El Tzirate-Huracán	115
9.3.1.13 Domos El Burro-La Taza	115
9.3.1.14 Escudos El Águila-Tetillas	116
9.3.1.15 Conos y <i>spatters</i> Coro Grande	117
9.3.1.16 Domos La Muela	117
9.3.1.17 Conos y <i>maar</i> Rancho Seco-Alberca	117
9.3.1.18 Conos y <i>spatters</i> Melón-Tendeparacua	118
9.3.1.19 Escudo El Frijol	118
9.3.1.20 Depósitos fluvio-lacustres y epiclásticos recientes	119
9.3.2 Sistemas estructurales en espacio y tiempo de la Región de Morelia	119

.3.2.1 Sistema NO-SE	120
9.3.2.2 Sistema NE-SO Mil Cumbres	120
9.3.2.3 Sistema E-O Morelia-Acambay	121
X. Discusión	124
10.1 El municipio de Morelia, una región de volcanes y lagos: una cronología de eventos geológicos desde hace más de 30 Ma	125
10.2 La geo-diversidad volcánica y de paisajes de la Región de Morelia	129
10.3 El patrimonio geológico y los sitios de geodiversidad: un recurso natural no valorado	134
10.4 La perspectiva holística de la geoconservación en el manejo de las Áreas Naturales Protegidas de la Región de Morelia	138
10.5 El conocimiento geológico y la estrategia de geoconservación, una clave para la contingencia de los peligros naturales	141
XI. Conclusiones	143
Referencias	146
Anexos	157
Anexo 1. Marco Téorico: Áreas Naturales Protegidas	157
Anexo 2. Bibliografía temática de la Geología de la Región de Morelia	172
Anexo 3. Localización de las Geoformas Volcánicas de la Región de Morelia	193
Anexo 4. Recopilación de edades isotópicas de la Región de Morelia	199

RESUMEN

La Región de Morelia es un área que comprende al municipio de Morelia y parte de otros 15 municipios que lo rodean, cubriendo un área de ~2858 km², que además integra 14 Áreas Naturales Protegidas (ANP's) de administración estatal y federal. Se localiza en la porción central de la Faja Volcánica Transmexicana, con características geológicas principalmente configurada por volcanes, lagos y fallas. Desafortunadamente, la región es susceptible a peligros geológicos que desde la década de los ochenta han sido estudiados, reconociendo diversas problemáticas geológico-ambientales. El peligro geológico de la región es en gran parte causado por el crecimiento irregular sin aparente planeación del crecimiento del área urbana de la ciudad de Morelia, así como por ignorar la oportunidad que podrían ofrecer estrategias de desarrollo territorial sustentable como la geoconservación. El objetivo de este trabajo es describir la diversidad de la morfología volcánica, morfoestructural y geológica de la Región de Morelia, para que esta pueda ser contextualizada como una alternativa hacia una estrategia de geoconservación, así como con el manejo de las Áreas Naturales Protegidas, las cuales han sido propuestas bajo un enfoque biocentrista. La geoconservación plantea un enfoque holístico que integra la importancia de la diversidad de los recursos bióticos y abióticos para promover formas de desarrollo territorial sustentable basado en su geodiversidad y su geopatrimonio, así como con estrategias de manejo como el geoturismo y los geoparques. Las estrategias de geoconservación asociadas con el manejo de las Áreas Naturales Protegidas pueden incrementar las oportunidades de preservación ambiental y desarrollo social, ya que estas poseen por decreto la vocación de conservación ambiental. La metodología aplicada en este trabajo parte de una extensa revisión bibliográfica de trabajos relacionados con la geología de la región y la recopilación de materiales cartográficos de alta resolución como modelos digitales de elevación LIDAR de 5 m e imágenes SPOT 6 pancromática de 1.5 m y multiespectral de 6 m. Se identificaron y clasificaron todos los edificios volcánicos de la región. La carta geológica a escala 1:50,000 con verificación de campo, permitió describir 20 unidades geológicas asociadas con grandes eventos geológicos

desde el Oligoceno (30 Ma) hasta el Holoceno (3200 a), para posteriormente realacionarlas con las unidades de diversidad de paisaje y por lo tanto a un geopatrimonio.

Los resultados obtenidos de la morfología volcánica y la cartografía morfoestructural y geológica permitieron tener una discusión preliminar acerca del papel de las ANP's y sus implicaciones en la geoconservación en la Región de Morelia. Se concluye que la diversidad geológica podría aportar oportunidades de desarrollo social aproximándose con una estrategia de geoconservación. Se propone que, ante los problemas geológico-ambientales y la ineludible expansión urbana desordenada, el conocimiento geológico a través de la estrategia de geoconservación aportaría también a la mejor toma de decisiones de la planificación territorial.

ABSTRACT

The Morelia Region is an area that includes the municipality of Morelia and partially other 15 surrounding municipalities, which covers an area of ~2858 km² including within it 14 Protected Natural Areas. The Morelia Region is located in the central portion of the Trans-Mexican Volcanic Belt and is mainly configured with geological features like volcanoes, lakes, and faults. Unfortunately, the region is susceptible to geological hazards described by different works since the 1980s. Geological hazard is largely caused by the urban area growth of the Morelia city that continues to expand without adequate territorial planning. The main subject of this work is to describe geological, volcanic morphologies and morphostructural diversity in order to approach to the geoconservation strategy and review the role of the Protected Natural Areas, and therefore avoid a common bias of biocentric approach. Geoconservation proposes a holistic approach that integrates the importance of the diversity of biotic and abiotic resources to promote forms of sustainable territorial development based on its geodiversity and geoheritage, as well as management strategies such as geotourism and geoparks. Geoconservation strategies associated with the management of Protected Areas can increase the opportunities for environmental preservation and social development.

In this work was applied methodology based on an extensive bibliographical review of works related to the geology of the region and the compilation of high-resolution cartographic materials such as digital LiDAR elevation models of 5 m and SPOT 6 panchromatic 1.5 m and multispectral 6 m images. All volcanic building were identified and classified. Morphostructural analysis was carried out to define landscape domains and their relationships with tectonic or morphostructural structures. Geological mapping at a scale of 1:50,000 with field work led to define 20 geological units associated with major geological events from the Oligocene (30 Ma) to the Holocene (3,200 a) and sucessively they were associated with morphostructural landscape domains and therefore to the geodiversity.

Volcanic morphology, morphostructural and geological results allow to have a preliminary discussion about the role of Protected Areas in the Region of Morelia and their geoconservation implications. It is concluded that the geological diversity could provide an opportunity of local development by the holistic geoconservation insight of the territory. The geoconservation assessment of the territory would have a direct impact on better decision in front of the geological hazard and lack of planning of the urban growth of the Morelia Region.

I. INTRODUCCIÓN

La geoconservación es considerada una estrategia de desarrollo territorial que propone un manejo holístico del territorio a partir de la valoración integral de su patrimonio abiótico, biótico, cultural e histórico. Este movimiento surge en Europa a finales de los ochenta como respuesta al enfoque tradicionalmente biocéntrico de la conservación de la naturaleza, centrada en la conservación de los recursos bióticos (flora y fauna). Sin embargo, la biodiversidad de la Tierra es en gran parte debida a la evolución en tiempo y espacio de los procesos geológicos; en consecuencia, para que un manejo del territorio sea efectivo es necesario tener un entendimiento y acercamiento holístico (Gray, 2005). Por otro lado, la geoconservación no se enfoca solo en la importancia del medio abiótico para la conservación de los sistemas biológicos, sino que tiene un valor propio e independiente de los roles que cumplen para sostener a la biodiversidad (Sharples, 2002). De acuerdo con este último autor, la geoconservación tiene como objetivo preservar la diversidad natural de las características geológicas, geomorfológicas, de suelos, así como la interacción entre las tasas de cambio durante la evolución de sus procesos.

Con la sucesión de eventos y programas clave como el Humano y la Biosfera en 1972 y la cumbre de la Tierra en 1992 en Río de Janeiro, en los cuales se planteaba fomentar una nueva forma de interacción con la naturaleza basada en el desarrollo sostenible, se pensó que la creciente preocupación por el deterioro del medio ambiente y la biodiversidad atraería interés hacia la protección de los sistemas geológicos, por lo cual surge el concepto de geodiversidad (Gray, 2018). Esta es la diversidad de las características geológicas, geomorfológicas y edafológicas; incluye su ensamble, estructuras, sistemas y contribuciones al paisaje (Gray, 2013). A partir de la identificación y valoración de la geodiversidad y el patrimonio geológico, la geoconservación se ha planteado una serie de estrategias exitosas de desarrollo local económico como el geoturismo y los geoparques. La idea de que el desarrollo territorial sustentable podría emerger desde la protección del patrimonio geológico fue reconocida por la UNESCO en 2015 con la creación del Programa Internacional de Geociencias y

Geoparques (Reynard y Brihla, 2018). Actualmente, este programa cuenta con 177 Geoparques Globales distribuidos en 46 países, concentrados en Europa y China, con casos más aislados en Sudamérica, América Central y Canadá. México se unió al programa y cuenta con dos Geoparques Globales; el Geoparque Comarca Minera en el estado de Hidalgo y el Geoparque Mixteca Alta en el estado de Oaxaca, ambos designados en el año 2017. Sin embargo, las referencias a los geositios, geomorfositos y geoparques en México aún son escasas y la legislación ambiental actual no contempla de manera explícita la protección de la geodiversidad y el patrimonio geológico (Palacio-Prieto *et al.*, 2016). En este contexto, se ha expuesto que dada la vocación de conservación que tienen las Áreas Naturales Protegidas, estas constituyen un precedente y una coyuntura legislativa para la implementación de estrategias de geoconservación, ya que las áreas mismas contienen el geopatrimonio como un componente generalmente no descrito y las estrategias de manejo resultan complementarias y de ninguna manera opuestas, que pueden incrementar las oportunidades de preservación ambiental y desarrollo social (Palacio-Prieto, 2015).

La Región de Morelia, con una historia geológica configurada principalmente por volcanes, lagos y fallas desde hace más de 30 Ma, está ubicada en la porción central de la Faja Volcánica Transmexicana. Es una región con diversas problemáticas geológico-ambientales relacionadas con sus características naturales y acentuadas por una expansión urbana carente de perspectiva geológica y geomorfológica. A pesar de los numerosos estudios relacionados al conocimiento geológico de la región, así como de sus problemáticas geológico-ambientales, no se cuenta hasta el momento con una carta geológica de base y actualizada que contenga la integración de los trabajos de diversas áreas locales o incluso del abordaje a problemas ambientales específicos de esta región. Por otro lado, la Región de Morelia cuenta con 14 Áreas Naturales Protegidas de administración estatal y federal. Ante este escenario geológico y ambiental, el objetivo de este trabajo es analizar la geodiversidad de la Región de Morelia como una propuesta para evaluar su patrimonio geológico desde una perspectiva del paisaje, la geología y la geoconservación, considerándolo una estrategia alternativa para el desarrollo local sustentable, la mitigación de los riesgos geológicos y como una herramienta para la toma de decisiones de planificación del territorio.

Se concluye que en las decisiones políticas públicas y de conciencia entre la sociedad, prevalece un panorama de indiferencia y desconocimiento generalizado hacia los estudios y

conocimiento de los sistemas geológicos de la Región de Morelia. Se considera que la divulgación del conocimiento geológico, a través de las estrategias de geoconservación son una alternativa para la concientización, atención y generación de propuestas para enfrentar las problemáticas geológico-ambientales y la ineludible expansión urbana de la ciudad de Morelia y sus tenencias rurales.

II. GENERALIDADES

2.1 Localización geográfica, localidades y vías de acceso

El área de estudio, denominada en adelante Región de Morelia (RM), es un polígono que cubre por completo al municipio de Morelia e incluye en sus límites parte de otros municipios, con la finalidad de facilitar la observación e interpretación del paisaje y rasgos geológicos. Se localiza en la parte nororiental del estado de Michoacán, en la porción centro-sur de México. Se ubica en la porción central de la Faja Volcánica Transmexicana, en una región de paisaje constituida esencialmente por lagos y volcanes. Al norte, es delimitada por el lago de Cuitzeo, al este y sureste por la Sierra de Mil Cumbres y al oeste por el lago de Pátzcuaro y el abundante vulcanismo monogenético del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG). La Región de Morelia corresponde a un cuadrante que se ubica entre las coordenadas 19.43°-19.88° latitud norte y 101.55°-101.04° longitud oeste. Comprende un área total de 2858 km². Abarca los municipios de Morelia, Tarímbaro, Lagunillas y Huiramba, y parcialmente a los municipios de Madero, Tzitzio, Charo, Acuitzio, Pátzcuaro, Tzintzuntzan, Quiroga, Coeneo, Huaniqueo, Chucándiro, Copándaro, Cuitzeo y Álvaro Obregón (Figura 1).

Las localidades urbanas y rurales del área se encuentran bien comunicadas por una red de carreteras federales libres y de peaje, carreteras estatales y municipales, calles y caminos de terracería. Además de las vías de comunicación terrestre, al noreste del área de estudio se encuentra el Aeropuerto Internacional General Francisco Mujica, al norte de Álvaro Obregón. Algunas localidades principales son; Acuitzio del Canje, Cuanajo, Huiramba y Lagunillas al suroeste; Quiroga, Tzintzuntzan y Capula al oeste; Morelia, Jesús del Monte, Charo y La Goleta en la porción centro-oriente; y Álvaro Obregón, Copándaro de Galeana, Cuto del Porvenir, Tarímbaro, Tájaro de los Izquierdo y Uruétaro al noreste. En la zona noroeste se distribuyen pequeñas localidades rurales como Tecacho, La Cañada, San Pedro Puruátiro, Teremendo de los Reyes, Tiristarán, entre otras.

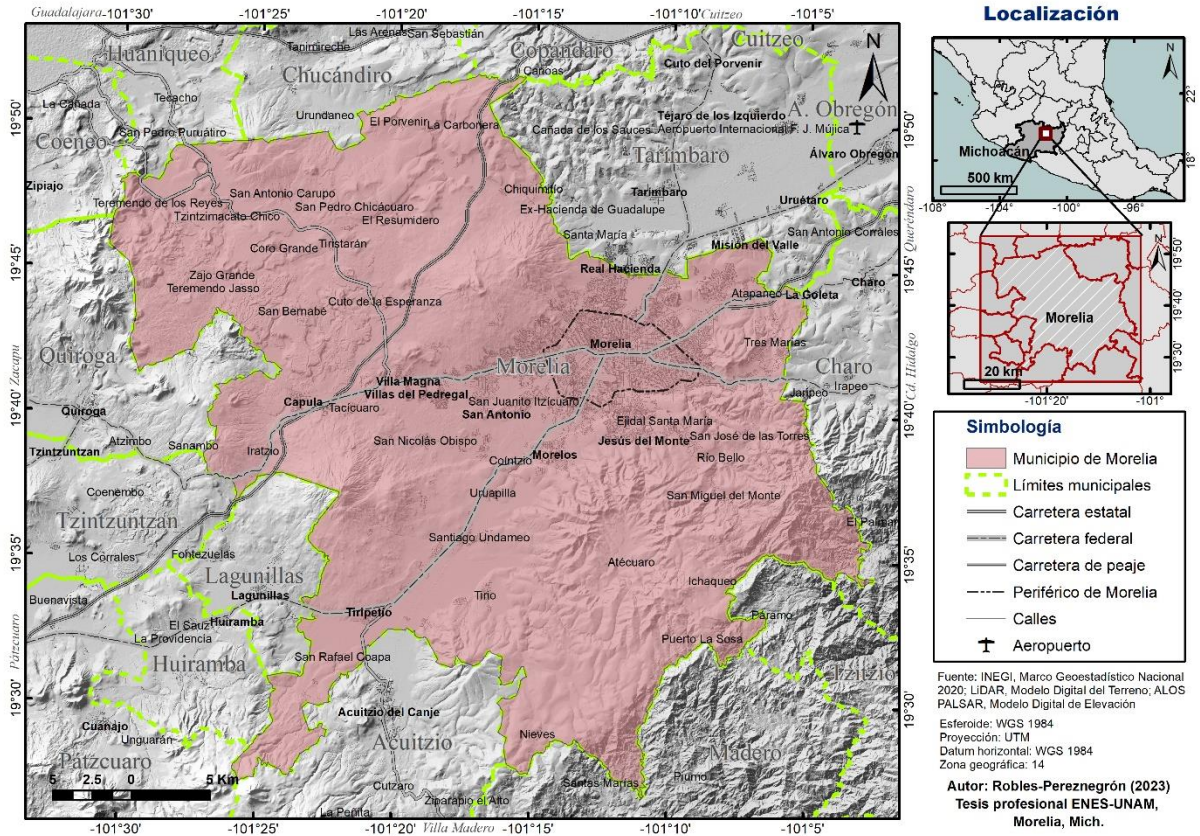


Figura 1. Localización geográfica de la Región de Morelia. Se muestran los límites del municipio de Morelia (polígono color rosa) y municipios colindantes, así como las principales vías de acceso. Con líneas color verde se marcan los límites de los municipios y sus nombres se muestran en color gris. En negritas se etiquetan las localidades consideradas urbanas por su mayor densidad de población.

Se puede llegar a la zona por medio de varias carreteras que se dirigen a la ciudad de Morelia: desde el sur, pasando por Acuitzio del Canje, se puede acceder por la carretera estatal Tiripetío-Eréndira, que proviene de la población de Villa Madero, y se une en Tiripetío con la carretera federal 14 Morelia-Pátzcuaro; desde el oeste se puede llegar a la zona por la carretera federal 15 Morelia-Jiquilpan, pasando por Quiroga y Capula; desde el este se comunica por medio de la carretera federal 15 Morelia-Toluca que proviene de Cd. Hidalgo y la carretera federal 126 Atlacomulco-Morelia que proviene de Queréndaro; desde el noreste se puede llegar por las carreteras federales 120 y 43, Huajúbaro-San José y Morelia-Salamanca, que provienen de Zinapécuaro y Cuitzeo, respectivamente y; desde la zona noroeste de la Región de Morelia, pasando por Tecacho, Tiristarán y Cuto de la Esperanza, por medio de la continuación del tramo carretero municipal Tecacho-San Pedro Puruátiro, la carretera estatal Ramal La Alberca- San Pedro Puruátiro y por último el tramo estatal

Teremendo-Cuto de la Esperanza, se puede enlazar con la carretera federal 15 Morelia-Jiquilpan con rumbo a Morelia.

2.2 Cuencas hidrográficas

En la Región de Morelia confluyen dos regiones hidrográficas, la Lerma-Santiago y la del Balsas, que a su vez se subdividen en cuencas y subcuencas. La cuenca Lerma Santiago es la región hidrográfica más grande del país, se forma en el río Lerma en el estado de México y desemboca en el océano Pacífico con una orientación general NO-SE, pasando por los lagos de Cuitzeo y Chapala, los dos lagos más grandes del país. En el área de estudio, la cuenca Lerma-Santiago se subdivide en las subcuencas de Pátzcuaro, Río Angulo y Zirahuén (Figura 2).

Por otro lado, la región hidrográfica del Balsas nace en el estado de Puebla y desemboca en el océano Pacífico. Esta región está estrechamente relacionada a un sistema de fallamiento regional con dirección NE-SO, como puede observarse en la orientación del lineamiento morfoestructural que divide a las dos regiones hidrográficas al sureste de la región (Figura 2). La cuenca hidrográfica del Balsas, en la región es dividida por las subcuencas Purunguéo, Carácuaró y una muy pequeña parte de la subcuenca de Tacámbaro, la primera de la cuenca Cutzamala y las dos últimas de la cuenca de Tacámbaro.

La Región de Morelia es mayormente controlada por las redes hidrográficas de la subcuenca del lago de Cuitzeo. Esta es una cuenca lacustre endorreica, en la que el drenaje superficial se concentra en la parte más baja de la cuenca, al norte de la misma, en donde se encuentra el lago de Cuitzeo, el segundo lago más extenso del país, solamente superado por el lago de Chapala (Cram *et al.*, 2010). De acuerdo con estos últimos autores, el agua contenida en el lago proviene de los escurrimientos superficiales de la cuenca, principalmente de los ríos Grande de Morelia, Queréndaro y Zinapécuaro, del agua de lluvia que precipita directamente sobre el lago, y de manantiales de aguas termales que se encuentran dentro y en los alrededores del mismo. Las únicas salidas naturales del agua son las causadas por la evaporación y los aportes a acuíferos.

El cuerpo de agua más extenso en la región corresponde a la presa de Cointzio, al sur de Morelia. Al norte de Cointzio se localiza el manantial La Mintzita y al sur sobresalen los lagos de Umécuaro y Loma Caliente. Al noroeste de la región se encuentran los lagos de La

Alberca y Las Rosas. En el límite occidental de la región se localiza la ribera este del lago de Pátzcuaro, y en el límite norte la ribera sur del lago de Cuitzeo, cuyos cuerpos de agua emergentes se extienden ampliamente al norte del área de estudio.

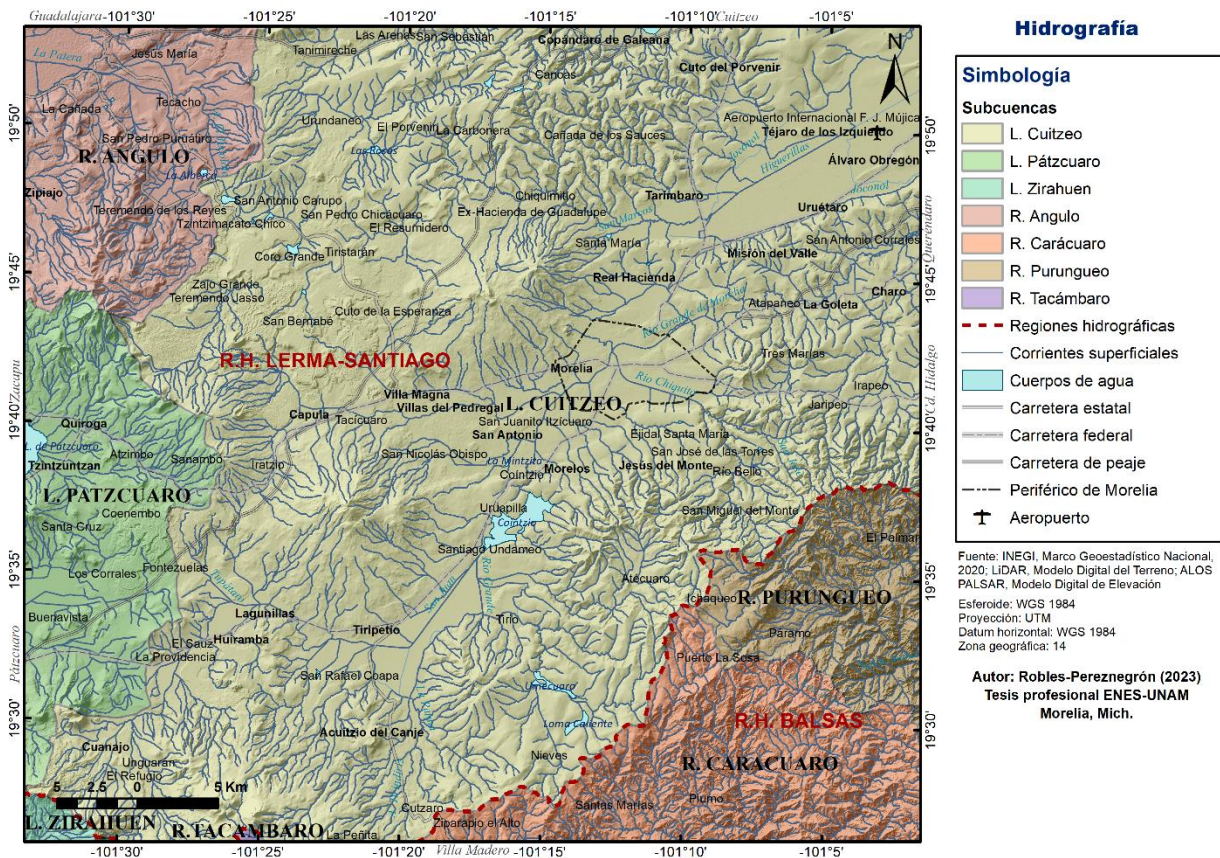


Figura 2. Mapa de subcuencas hidrográficas. La subcuenca del lago de Cuitzeo es la de mayor extensión. En mayúsculas se etiquetan los nombres de cada subcuenca. Se señalan también algunos ríos y canales importantes como el Río Grande de Morelia, Río Chiquito, San Marcos, Joconol, Higerillas, entre otros. Con línea punteada de color rojo se señala el límite entre las dos regiones hidrográficas Lerma Santiago y Balsas.

2.3 Climas

De acuerdo con la clasificación climática de Köppen modificada por García y CONABIO (1998) en la Región de Morelia se distinguen 5 diferentes tipos de climas. Los climas más representativos de la región corresponden a climas templados subhúmedos [C(w0), C(w1) y C(w2)] (Figura 3). Los climas con clave C(w1) y C(w2) presentan una temperatura media anual entre 12° y 18°C con una temperatura de 22°C durante el mes más caluroso y de entre 3° y 17°C durante el mes más frío, la precipitación anual es de 200 a 1800 mm. En la zona noreste se presenta un clima templado subhúmedo semicálido [C(w0)], con temperatura media anual entre 12° y 18°C, con entre 3° y 18°C durante el mes más frío y bajo 22°C

durante el mes más caliente, la precipitación anual ronda entre los 500 y 2500 mm. De manera más aislada, en la región también se identifica un clima semifrío subhúmedo con verano fresco largo [Cb'(w2)] y un clima semicálido subhúmedo [(A)C(w1)]. El primero presenta una temperatura media anual entre 5° y 12°C, con temperatura del mes más frío entre 3° y 18°C, temperatura del mes más caliente bajo 22°C y una precipitación anual entre 200 y 1800 mm. El segundo tipo [(A)C(w1)] presenta una temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor a 18°C y mayor de 22°C durante el mes más caliente, con precipitación anual entre 599 y 2500 mm.

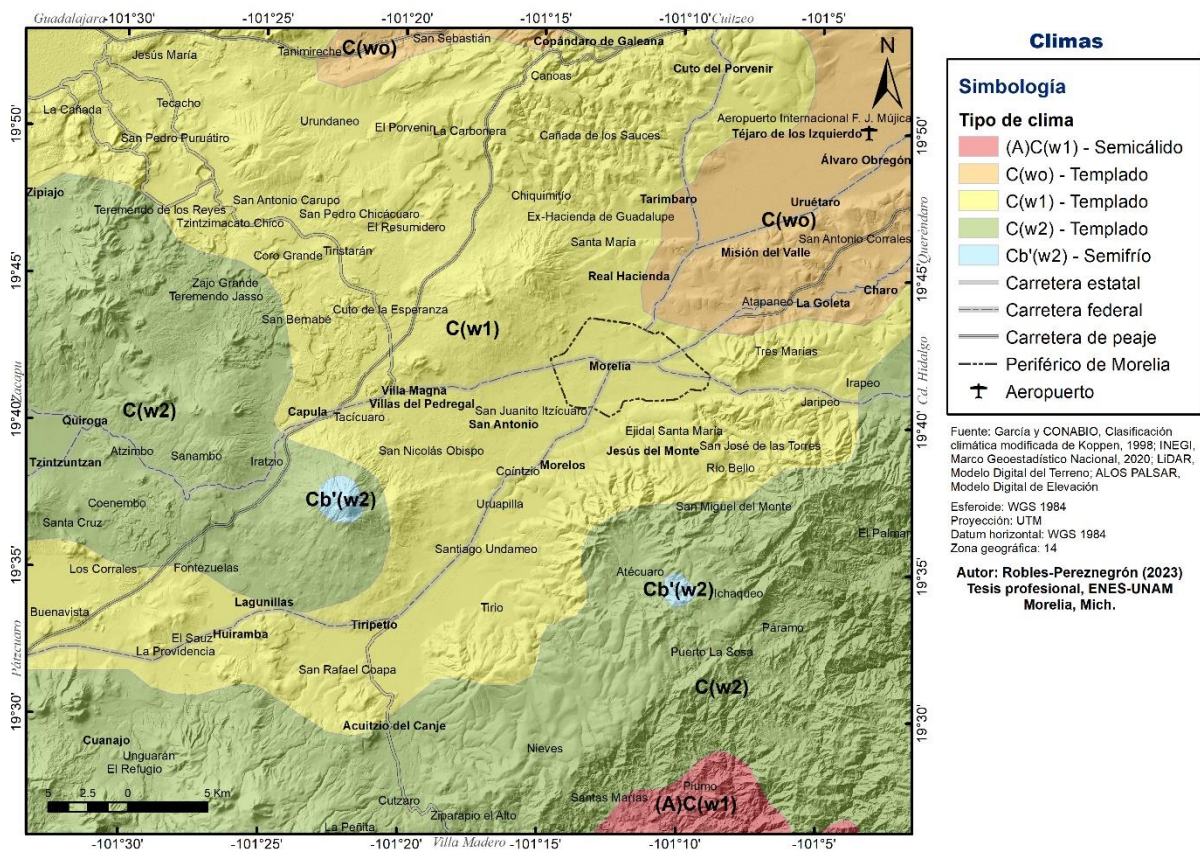


Figura 3. Mapa de la distribución de los tipos de climas en la región (García y CONABIO, 1998), los cuales en general corresponden a climas templados [C (wo), C (w1) y C (w2)] en tonos naranja, amarillo y verde respectivamente. También se presenta clima semicálido [(A) C (w1)] al sureste de la región representado en el mapa con color rojo y clima semifrío [Cb' (w2)] en la cima del cerro del Águila y en el borde sureste de la estructura de la caldera de colapso de Atécuaro identificado con color azul claro.

III. MARCO GEOLÓGICO DE LA REGIÓN DE MORELIA

3.1 Geología regional de la Región de Morelia

La geología de la Región de Morelia está representada de manera regional por la intersección de dos grandes provincias volcánicas y las secuencias fluvio-lacustres de la antigua subcuenca Morelia-Charo. La provincia volcánica más antigua se distribuye en la porción oriental de la región, representada por el vulcanismo de la Sucesión del Oligoceno (?)-Mioceno de Tafetán y Sierra de Mil Cumbres; la segunda provincia corresponde a los productos del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato del Plioceno-Holoceno que se expone en toda la porción occidente de la región. Sobreyaciendo de manera concordante a los productos de la Sierra de Mil Cumbres, en la zona centro-oriental de la región se ubica el tercer gran elemento de la geología regional, las secuencias fluvio-lacustres del Mioceno-Plioceno de la antigua Subcuenca Morelia-Charo (Israde-Alcántara, 1995; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999) (Figura 4).

Las tres provincias volcánicas de la Región de Morelia, se encuentran dislocadas y muchas veces en contacto con los sistemas de fallamiento NE-SO y E-O (Garduño *et al.*, 1999). Esto significa que los contactos muchas veces son de tipo tectónico, así como en otras ocasiones se encuentran separadas por pequeñas fosas (grábenes), asociadas con subcuencas hidrográficas fluviales de relleno o bien, desniveles de relieve renovados, así como por la aparición de edificios volcánicos asociados con los sistemas de fallas activos desde el Plioceno. Por lo tanto, aunque como se verá más adelante se pueden observar dominios de paisaje asociados con una provincia geológica, en realidad la región presenta una estructura heterogénea de volcanes y lagos asociados a estructuras tectónicas de tipo extensional con desniveles de cientos de metros.

En este capítulo se plasma una síntesis de los antecedentes más importantes en torno al conocimiento de la geología de la Región de Morelia. Es resultado de la búsqueda, revisión, selección y estudio de material bibliográfico; con énfasis en aquellos trabajos que han aportado cartografía geológica, descripción de unidades y procesos geológicos asociados, así

como fechamientos en diferentes unidades geológicas. El capítulo ha sido dividido en cuatro partes. Los primeros tres apartados tratan del estado del arte de las grandes unidades geológicas regionales y en el cuarto apartado se sintetizan las más recientes contribuciones en torno al vulcanismo superior de la región (Mioceno Tardío y Plioceno-Holoceno), que se asocia al vulcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana, actual arco volcánico en el centro de México.

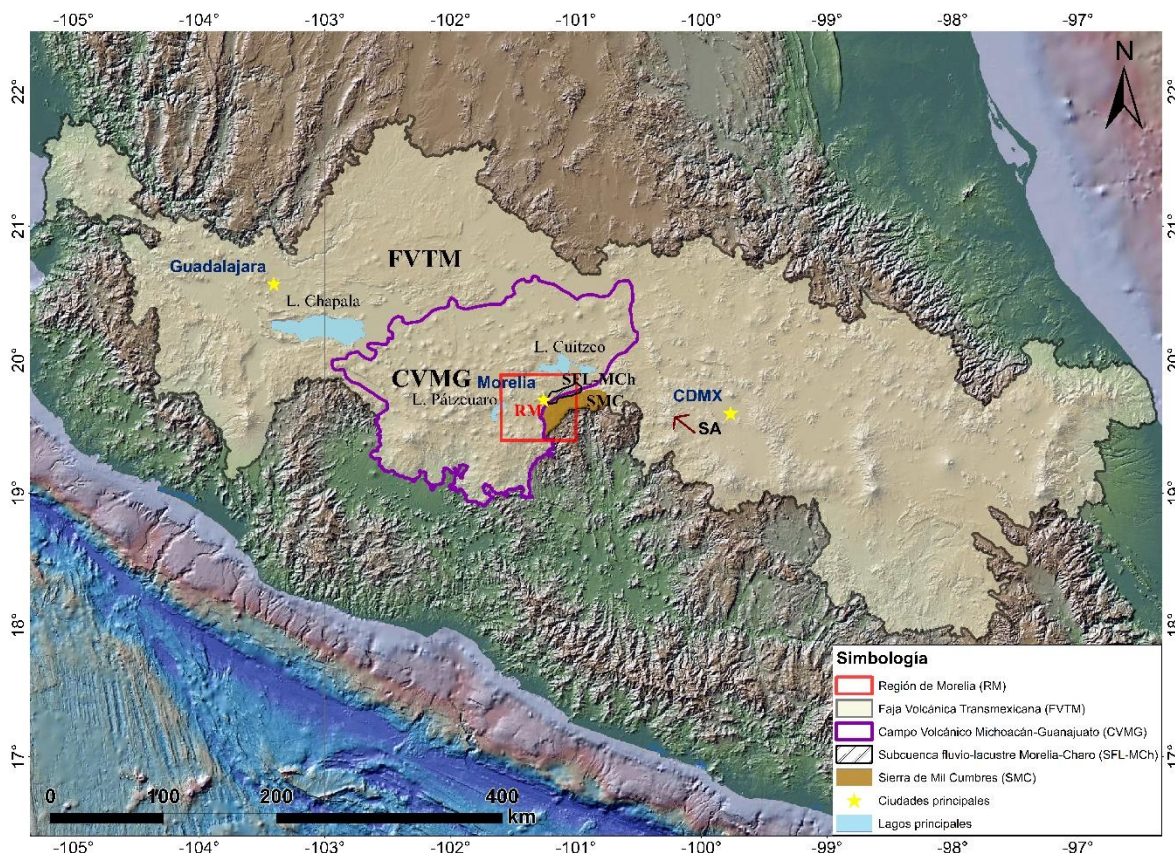


Figura 4. Localización regional de la Región de Morelia y límites de las provincias geológicas de referencia más importantes: FVTM, Faja Volcánica Transmexicana; CVMG, Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato; SMC, Sierra de Mil Cumbres; RM, Región de Morelia; SFL-MCh, Secuencia fluvio-lacustre Morelia-Charo; SA, Sierra de Angangueo.

3.2 Sucesión Volcánica del Oligoceno (?)-Mioceno Tafetán y Sierra de Mil Cumbres

Las rocas más antiguas de la región se ubican al sureste del municipio de Morelia. Esta área se caracteriza por un extenso paisaje de sierra y profundos valles cuya disección vertical alcanza los 1200 m s.n.m, en comparación con las zonas bajas y llanas del municipio de

Morelia que se encuentran entre 1800-1900 m s.n.m. En esta zona, la actividad volcánica ha permanecido ausente desde el Mioceno Inferior (Blatter y Hammersley, 2010; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Desde entonces, la cambiante actividad tectónica y los procesos erosivos han sido los principales factores encargados de la renovación del paisaje. El vulcanismo miocénico de la región se encuentra bien representado en toda la porción oriental del área de estudio, representando el principal sustrato de la ciudad de Morelia y su entorno. Antes de describir los antecedentes de la Sucesión Tafetán y Sierra de Mil Cumbres es oportuno hacer mención de su basamento relativo. De acuerdo con Pasquarè *et al.* (1991), el basamento relativo y pre-volcánico de la región está conformado por una sucesión volcánica y sedimentaria de arco de isla del Jurásico-Cretácico, deformada y metamorfozada que fue acrecionada al continente durante la orogenia Larámide, a la cual se conoce como Terreno Guerrero (Campa y Coney, 1983). Sucesivamente y posterior a la deformación Larámide, se reconoce sobreyaciendo con una ligera disconformidad a una sucesión de rocas molásicas conformada por conglomerados, areniscas y limolitas, probablemente del Eoceno, denominada Formación Tzitzio (Pasquarè *et al.*, 1991).

Sobreyaciendo con ligera disconformidad a la Formación Tzitzio se encuentra la Sucesión Tafetán, una sucesión de vulcanismo continental asociado a la extensión sureña de la Sierra Madre Occidental, que se expone en la porción sureste de la Región de Morelia. Consiste en flujos de lava, conglomerados volcánicos, areniscas, limolitas e ignimbritas contenidas y plegadas en el anticlinal de Tzitzio (Mavois *et al.* 1977; Pasquarè *et al.*, 1991). Esto último hace referencia a una corta fase compresiva del Mioceno Temprano que generó una megaestructura antiformal con orientación NNO-SSE denominada el anticlinal de Tzitzio-Tiquicheo (Mavois *et al.* 1977). Pasquarè *et al.* (1991) plantean que este breve evento de deformación separa a la Sucesión Tafetán de la sobreyacente Sierra de Mil Cumbres. Con respecto a la temporalidad de la Sucesión Tafetán, de acuerdo con Gómez-Vasconcelos *et al.* (2015) la sucesión Tafetán es cortada por un dique gabroico con orientación NE-SO cerca de Tuzantla, para el cual reportan una edad de 30 ± 0.6 Ma (Oligoceno).

La Sierra de Mil Cumbres es definida por primera vez por Silva-Mora (1979) como una secuencia de lavas basálticas, andesíticas y dacíticas intercaladas con depósitos ignimbríticos del Mioceno. Pasquarè *et al.* (1991) la describen junto a la Sierra de Angangueo como una

sucesión de flujos de lava basálticos y andesíticos y brechas ocasionalmente intercalados con flujos piroclásticos y conglomerados volcánicos que llegan a exceder los 1200 m de espesor. Más recientemente Gómez-Vasconcelos *et al.* (2015) redefinen a la Sierra de Mil Cumbres, reportan análisis químicos, nuevas edades isotópicas e interpretaciones de la evolución geológica de la sierra. De acuerdo con estos autores, la sierra es subyacida por una unidad de lavas basáltico-andesíticas con una edad de 21.5 ± 0.1 Ma, la cual se puede correlacionar regionalmente con lavas de la zona de Los Azufres, al oriente del área de estudio, con derrames de lava con una edad reportada de 23.1 ± 3.5 Ma (Pérez-Esquivias *et al.*, 2010; Arce *et al.*, 2012), así como con lavas de la Sierra de Anganguo (Pasquarè *et al.*, 1991; Hernández-Bernal *et al.*, 2016).

La Sierra de Mil Cumbres se compone por 4 estructuras volcánicas principales: Caldera La Escalera (23 Ma), Caldera de Atécuaro (16.3 Ma), Complejo Volcánico Garnica (18.3-16.8) y Complejo Volcánico de Indaparapeo (17.5-14.1 Ma). En la región de Morelia, los eventos silícicos y explosivos de las calderas La Escalera y Atécuaro presentan vastos depósitos de material ignimbrítico que están alternados con la emisión de domos dacíticos y andesíticos con edades del Mioceno Inferior, incluido el C. Punhuato, al este de la ciudad de Morelia, con una edad reportada de 16.3 Ma (Gómez-Vasconcelos *et al.* 2015) (Figura 5).

Cabe añadir que Pasquarè *et al.* (1991) reportan una unidad de ignimbrita de 20.5 Ma denominada Puerto La Sosa, la cual no es incluida en la definición propuesta por Gómez-Vasconcelos *et al.* (2015). También, al norte de la Región de Morelia y sur del lago de Cuitzeo se distribuye una sucesión volcánica de derrames de lava basáltico-andesíticos (18.689 ± 0.281 Ma), sobreyacidos por depósitos ignimbríticos (17.424 ± 0.012 Ma) de fuente desconocida, que son correlacionados a la Sierra de Mil Cumbres (Avellán *et al.*, 2020; Hernández-Bernal *et al.*, 2020; Trujillo Hernández *et al.*, 2022). Estos depósitos han sido abordados por diferentes autores y las edades y distribución de las secuencias volcánicas de esta área se han actualizado a partir de numerosos trabajos (Pasquarè *et al.*, 1991; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015; Cisneros-Máximo, 2016; Pola *et al.*, 2016; Trujillo-Hernández, 2017; Avellán *et al.*, 2020; Hernández-Bernal *et al.*, 2021; Trujillo-Hernández *et al.*, 2022).

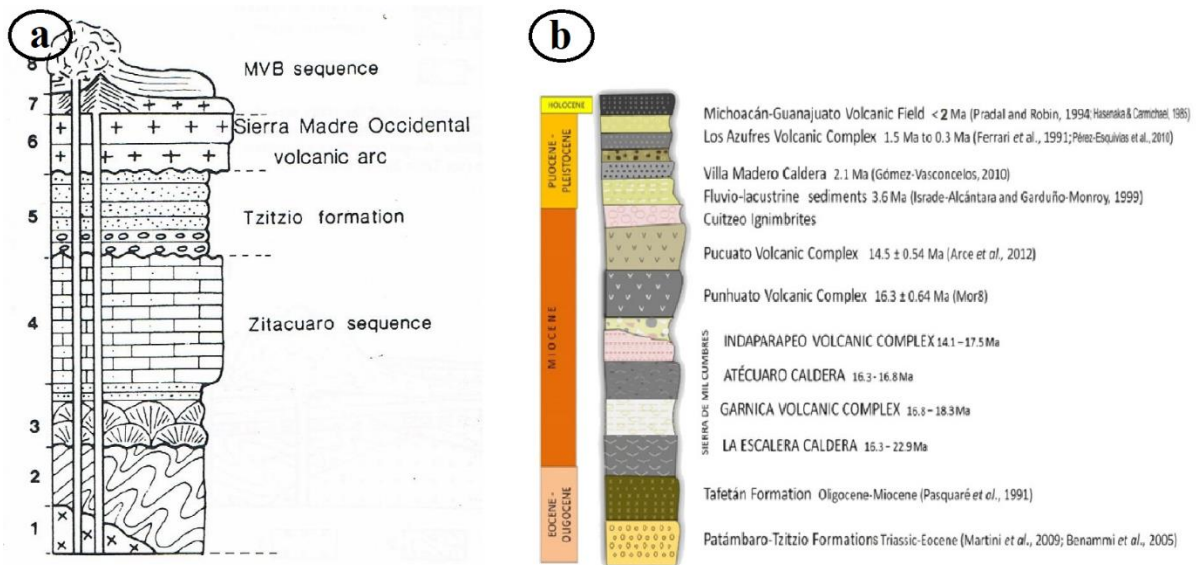


Figura 5. Columnas estratigráficas regionales que representan al basamento prevolcánico de la región, así como la Sucesión Tafetán y Sierra de Mil Cumbres. a) En esta sección esquemática estratigráfica de Pasquaré *et al.* (1991) se señalan algunos eventos prevolcánicos, incluida la formación Tzitzio (5), seguida por los productos de la Sierra Madre occidental (6), a la cual asocian a la sucesión Tafetán y Sierra de Mil cumbres, coronada por los productos de la Faja Volcánica Transmexicana. b) Columna de la Sierra de Mil Cumbres, tomada de Gómez-Vasconcelos *et al.* (2015). Se señala la sucesión de eventos volcánicos miocénicos en la definición de la Sierra de Mil Cumbres propuesta por estos autores.

3.3 Secuencia fluvio-lacustre de la Subcuenca Morelia Charo

En la zona centro-oriental de la Región de Morelia se ubica la subcuenca Morelia-Charo, una antigua zona de sedimentación fluvio-lacustre distribuida entre la ciudad de Morelia y Charo, con una orientación general ENE-OSO, en la que aflora una secuencia fluvio-lacustre que también forma parte del basamento relativo de la ciudad de Morelia, esto último con base en registros de perforaciones de pozos (Figura 6; Israde-Alcántara y Garduño Monroy, 2004). Israde-Alcántara (1995) como parte de su tesis doctoral realiza un análisis evolutivo de las secuencias lacustres de la subcuenca mediante un enfoque litoestratigráfico, bioestratigráfico y tectonoestratigráfico. Como resultado de este trabajo, describe cuatro subunidades estratigráficas (subunidades a-d) con variaciones laterales a lo largo de toda el área de estudio, las cuales son relacionadas con tres escenarios de deformación y complementadas con la información paleohidrológica y fisicoquímica que registran las diatomeas. Las subunidades de la secuencia lacustre definida por Israde-Alcántara (1999) son resumidas a continuación.

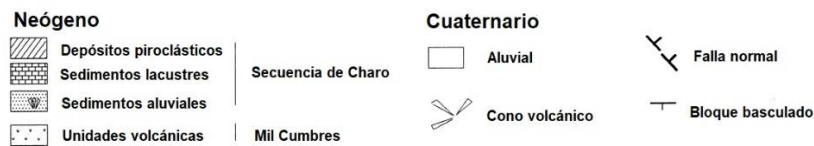
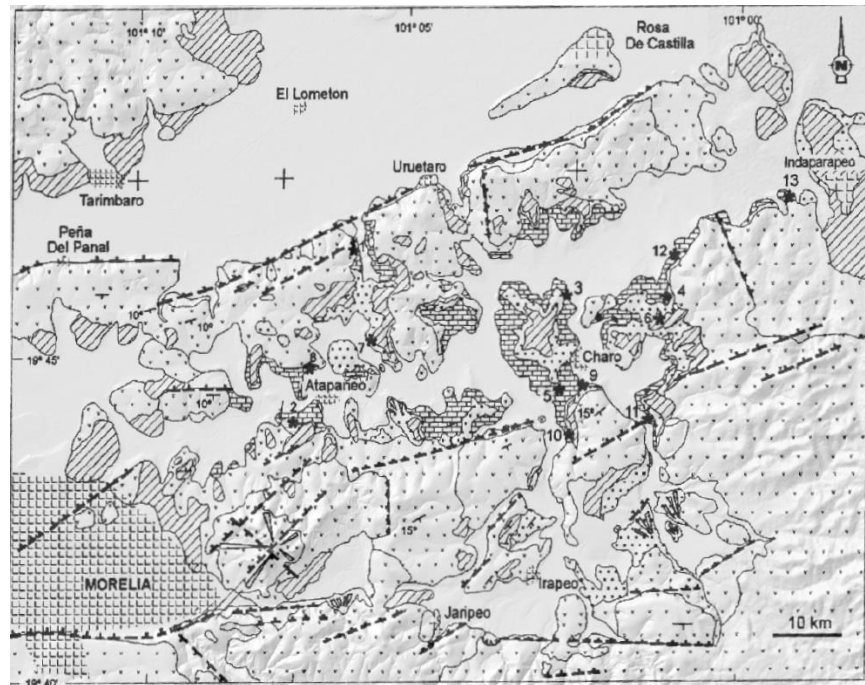


Figura 6. Cartografía geológica de la Subcuenca Morelia-Charo, localizada al este de la ciudad de Morelia (modificado de Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999).

La subunidad basal (subunidad a) está conformada por depósitos fluvio-lacustres que incluyen conglomerados, arenas, limos y arcillas, con delgados niveles de diatomitas (menores a 0.8 m) en la parte media y superior de la subunidad, y son cubiertos por un horizonte de oxidación de hasta 5 cm de espesor. Sobre este horizonte guía se encuentra la subunidad b, representada por una amplia unidad lacustre bien desarrollada conformada por una secuencia arcillosa seguida por un ensamble de diatomitas de hasta 8 m de espesor en la zona central del lago. La secuencia de diatomitas es más terrígena en la parte baja y se vuelve más pura y masiva hacia la parte alta. Esta subunidad contiene niveles de ceniza volcánica y está delimitada verticalmente por una superficie erosiva que está cubierta por depósitos fluviales de grano grueso que marcan el inicio de la siguiente unidad. La subunidad c está representada por un ambiente fluvial ampliamente extendido que desarrolla superficies erosivas en diferentes zonas internas del lago. Las facies representativas son conglomerados y arenas, pero hacia la parte superior se encuentran litofacies más finas como arcilla y yeso;

esta última probablemente indicando un periodo de sequía. Finalmente, la secuencia lacustre es cerrada por depósitos piroclásticos de caída conformados por pómez y líticos de tamaño milimétrico.

Israde-Alcántara (1999) relaciona las diferentes unidades estratigráficas con tres escenarios de deformación. El primero escenario de deposición (subunidad a) se asocia a fallas de rumbo con dirección NE-SO que afectan a andesitas del Mioceno (basamento relativo). El segundo escenario (subunidad b) se asocia a una reactivación extensional de las fallas NE-SO, durante esta etapa se registra el mayor levantamiento y exposición del nivel lacustre, evidenciado por la presencia de especies de diatomeas que requieren una mayor turbulencia y columna de agua. También se presentan diatomeas que requieren mayor contenido de sílice, lo cual probablemente se sustenta por el aumento de sílice generado por los primeros depósitos volcánicos de caída que se intercalan en la secuencia. El tercer y último escenario de deposición (subunidad c y d) es caracterizado por ser una etapa erosiva con cambios en la red del drenaje, generados por el basculamiento de bloques controlado por la actividad extensional de fallas con rumbo E-O. Israde-Alcántara (1999) concluye este análisis evolutivo planteando que la renovación del relieve generada por la última etapa de deformación ocasionó que el establecimiento de zonas lacustres más profundas migrase al norte en donde se encuentra el actual lago de Cuitzeo, segundo lago más extenso de México, después del lago de Chapala, el cual también es controlado por estructuras E-O y es posterior a la formación del paleolago de Cuitzeo.

3.4 El Campo Volcánico Michoacán Guanajuato

En este apartado se hace una síntesis de los avances relacionados al conocimiento del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, provincia fisiográfica que se extiende ampliamente en el occidente de la Región de Morelia. Se divide en cuatro breves apartados que tratan acerca de los primeros estudios relacionados al campo, la definición formal del campo, las variaciones espaciotemporales del vulcanismo, su estructura y por último una revisión general de sus características petrológicas.

3.4.1 Primeros estudios

Tras la erupción histórica del volcán Parícutin (1943-1952) en la región de la Meseta Purépecha, investigadores nacionales e internacionales brindaron especial atención al evento

que les permitía estudiar por primera vez a un volcán monogenético desde su nacimiento hasta su consumación. Aunque ya se había presentado dos siglos antes el nacimiento de otro volcán histórico a tan solo 80 km al sureste del Parícutin, el volcán Jorullo (1759-1774), este no habría sido estudiado bajo la lupa de la geología moderna que apenas comenzaría a desarrollarse un par de décadas más tarde.

El primer intento por regionalizar el vulcanismo de esta zona de Michoacán lo realizó Williams (1950), quien presentó los principales resultados de un reconocimiento geológico de aproximadamente 1500 km² alrededor del volcán Parícutin, promovido en 1944 por el Consejo Nacional de Investigación de Estados Unidos con el objetivo de determinar la relación del Parícutin con los volcanes vecinos, el área de estudio fue llamada la Región Volcánica del Parícutin. Habiendo formado parte del mismo comité de investigación que Howell Williams, Foshag y Gonzalez (1956) regionalizaron también su estudio del Parícutin como *The Michoacan Volcanic Province*, una porción de la Faja Volcánica Transmexicana entre el lago de Chapala al oeste y la Sierra de Oztumatlán al este, zona de transición entre las provincias Mesa Central al norte y la Sierra Madre del Sur. La zona también fue referida como *Zamora Volcanic Field* por Simkin *et al.* (1981).

3.4.2 Definición

La región donde se ubica el Parícutin, el más famoso de sus volcanes, es reconocida por diversos autores como uno de los campos volcánicos asociados a ambientes de subducción más grandes y con mayor densidad de centros eruptivos monogenéticos del mundo. El Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) fue definido por primera vez por Hasenaka y Carmichael (1985). Decidieron nombrarlo así debido a su distribución espacial que abarca porciones de los estados de Michoacán y Guanajuato, en la parte centro-occidental de la Faja Volcánica Transmexicana. Se trata de un campo localizado a una distancia de entre 200 y 440 km de la Trinchera de Mesoamérica, con una superficie aproximada de 40,000 km² que contiene más de 1000 centros eruptivos de edad cuaternaria, entre los cuales se reconocen conos de lava, domos, maares y anillos de toba, pequeños volcanes tipo escudo y flujos de lava sin cono asociado u oculto. A diferencia del resto de la Faja Volcánica Transmexicana, este campo carece de grandes volcanes poligenéticos y se estima que comenzó su actividad hace aproximadamente 3 Ma. El 75% de sus volcanes se emplazan

entre los 200 y 300 km de distancia de la Trinchera de Mesoamérica, con una mayor concentración a los 250 km en la Región Volcánica del Parícutin (Williams, 1950), una concentración aislada a los 380 km en la región del Valle de Santiago y el volcán más alejado está a 440 km de la trinchera (Figura 7). En general, los volcanes muestran un espaciamiento aleatorio, una minoría se asocia a lineamientos E-O en el norte del campo, ENE-OSO en la sección media y NE-SO en la parte sur, según las observaciones de Hasenaka y Camichael (1985) y Connor (1987).

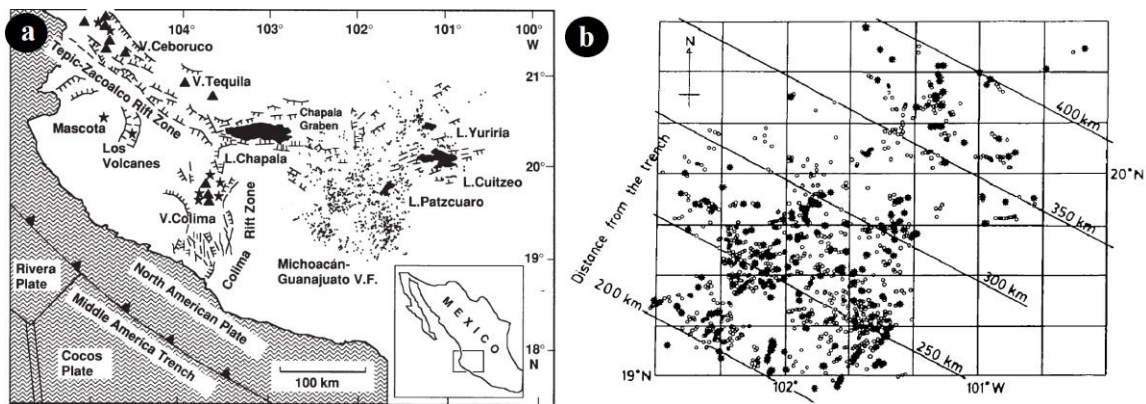


Figura 7. a) Localización geográfica del Campo Volcánico Michoacán Guanajuato y principales fronteras tectónicas. La concentración de puntos negros representa la distribución de los centros eruptivos monogenéticos (Hasenaka et al., 1994). b) Acercamiento a la distribución de los centros eruptivos del campo volcánico con respecto a la distancia de la trinchera de Mesoamérica. Se puede apreciar la mayor concentración de volcanes entre los 200 y 300 km de distancia (Hasenaka y Carmichael, 1987).

Entre los resultados más relevantes del trabajo de Hasenaka y Carmichael (1985) destacan el conteo pionero del total de volcanes; el cálculo de la densidad de los volcanes que dio como resultado $2.5/100 \text{ km}^2$ para todo el campo; la obtención de una tasa eruptiva de 30.5 km^3 para los últimos 40,000 años; y la utilización de parámetros morfométricos para caracterizar los conos y flujos de lava para estimar relaciones entre morfología y diferentes procesos de erosión. Estos datos permitieron hacer importantes observaciones como que su tasa eruptiva es baja en comparación con un solo volcán compuesto a pesar de su vulcanismo geográficamente extendido. Por ejemplo, el volcán Ceboruco ha generado $6 \text{ km}^3/1000$ años, el volcán Colima $2.5 \text{ km}^3/1000$ años mientras el CVMG genera $0.8 \text{ km}^3/1000$ años, como ejemplifican los mismos autores.

Después, Hasenaka *et al.* (1994) presentan un análisis similar al realizado por Hasenaka y Carmichael (1985) pero esta vez enfocado en los volcanes tipo escudo del campo (378 en

total), elementos clave para el entendimiento del campo debido a su superior aporte magmático en comparación con los conos de poco volumen.

3.4.3 Variaciones espaciotemporales del vulcanismo

Se ha propuesto que el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato presenta un vulcanismo con variaciones espacio-temporales para lo cual se han desarrollado algunos modelos y posibles explicaciones. Se ha indicado una tendencia general de migración del vulcanismo hacia el sur de la Faja Volcánica Transmexicana (Luhr y Carmichael, 1985; Cantagrel y Robin, 1987; Nixon, 1987). Ban *et al.* (1992) realiza nuevos fechamientos de volcanes tipo escudo y un importante estratovolcán (Tancítaro) e incluye las dataciones de Hasenaka y Carmichael (1985) para plantear que la actividad volcánica en el campo migró no de manera gradual sino abruptamente de norte a sur hace 1 millón de años. Esta relación es observada tanto para los volcanes tipo escudo como para los pequeños centros monogenéticos, sugiriendo que los dos tipos de vulcanismo se han desarrollado de manera contemporánea. Hasenaka y Carmichael (1994), con base en edades radiométricas y la estimación de tasas eruptivas exploran diferentes escenarios para el vulcanismo post-migración y proponen dos modelos: 1) primero dominaron los volcanes escudo, seguido por la actividad coetánea de escudos y conos pequeños y, 2) un periodo de escaso vulcanismo fue seguido por la actividad de los dos tipos de volcanes. Sin embargo, estos modelos son debatibles dados los aún escasos fechamientos con los que se contaba.

Ban *et al.* (1992) plantean que la migración probablemente se debió a cambios en el movimiento de la placa o en la ubicación y geometría de la zona de subducción. Hasenaka y Carmichael (1994) proponen que la migración probablemente resultó tanto del cambio de régimen de esfuerzos como por un cambio en la estructura termal de la fuente de magma en el manto superior. Esto último, con base en que las diferentes tasas eruptivas estimadas para los periodos de antes y después de 1 Ma están relacionadas a una diferente composición del magma, el vulcanismo del norte se caracteriza por magmas de temperatura relativamente baja y el vulcanismo más joven, del sur, por temperaturas más altas. Consideran razonable tener una mayor tasa eruptiva durante el periodo en el que fueron emitidos magmas más primitivos y de más alta temperatura. Mencionan que estas diferencias reflejan cambios en la estructura térmica, pero sugieren que es necesario un modelo tectónico y petrológico detallado para

constreñir los cambios en las condiciones fisicoquímicas de la región fuente del magma para encontrar una relación directa entre la migración del vulcanismo en superficie y los procesos magmáticos profundos que ocurren en el manto y la corteza.

No obstante, en trabajos más recientes en la zona sureña del campo volcánico, se discute la supuesta migración del vulcanismo de norte a sur (Guilbaud *et al.*, 2011; Guilbaud *et al.*, 2012). Mencionan la escasa información geocronológica con la que se contaba anteriormente y plantean que el vulcanismo ya se encontraba activo hace más de 3 Ma en la zona sur del CVMG, y que la teoría de migración puede ser explicada de diferente manera. Consideran que la migración del vulcanismo se trata más bien de la expresión de una zona sur con la tasa más alta de producción de magmas dentro de todo el campo (particularmente en la región de Tacámbaro-Puruarán), por lo tanto, una abundancia de morfologías volcánicas jóvenes al sur hace resaltar la morfología de volcanes más viejos al norte del campo. Favorecen la hipótesis de un incremento en la tasa de extensión litosférica ocurrida hace 5 Ma. De acuerdo con Johnson y Harrison (1990) una posible explicación puede derivarse del desarrollo durante el Cuaternario de la zona de falla Chapala-Tula, la cual es colineal con el frente del Campo Volcánico Michoacán Guanajuato, lo cual implica que la deformación en la placa continental puede controlar la localización del vulcanismo de manera local y regional. La zona de falla Chapala-Tula es colineal con dos grandes depresiones tectónicas modeladas por el fallamiento normal E-O, el lago de Chapala y el lago de Cuitzeo, los dos lagos más grandes del país.

3.4.4 Estructura y agrupación de edificios volcánicos (*clusters*)

Johnson y Harrison (1990) incluyen al Campo Volcánico Michoacán Guanajuato dentro de una zona estructuralmente compleja que denominan el Triángulo Michoacán (TM), situada entre la placa de Norteamérica al norte y los bloques corticales de Guerrero y Michoacán, al sureste y suroeste, respectivamente. El Triángulo Michoacán constriñe la porción sur del CVMG, en donde se encuentra la mayor densidad de aparatos volcánicos. Esta zona estructural es descrita como una región de fallamiento normal y vulcanismo anómalo con una falta de expresión dominante sobre una dirección de fallamiento preferencial, lo cual puede ser indicativo de un mayor grado de disrupción y extensión que no había sido observado en otra parte de la Faja Volcánica Transmexicana. La zona está confinada por tres sistemas de

fallas que forman un polígono triangular; al norte la zona de falla Chapala-Tula, con una dirección ESE-ONO; al oeste la zona de falla San Juanico Buenavista con dirección NO-SE; y al este una zona de falla con dirección NE-SO que separa al bloque Michoacán, en los límites con el *Gap* de Tzitzio o Sierra de Mil Cumbres, una zona con marcada ausencia de vulcanismo Plio-Cuaternario (Blatter y Hammersley, 2010; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Johnson y Harrison (1990) destacan dos grandes zonas de fallas dentro del Triángulo Michoacán, una que va de Uruapan a Morelia con dirección aproximada ENE y ligeramente curva (B en Figura 8) y otra con una pronunciada forma curva al noroeste de esta última (A en Figura 8).

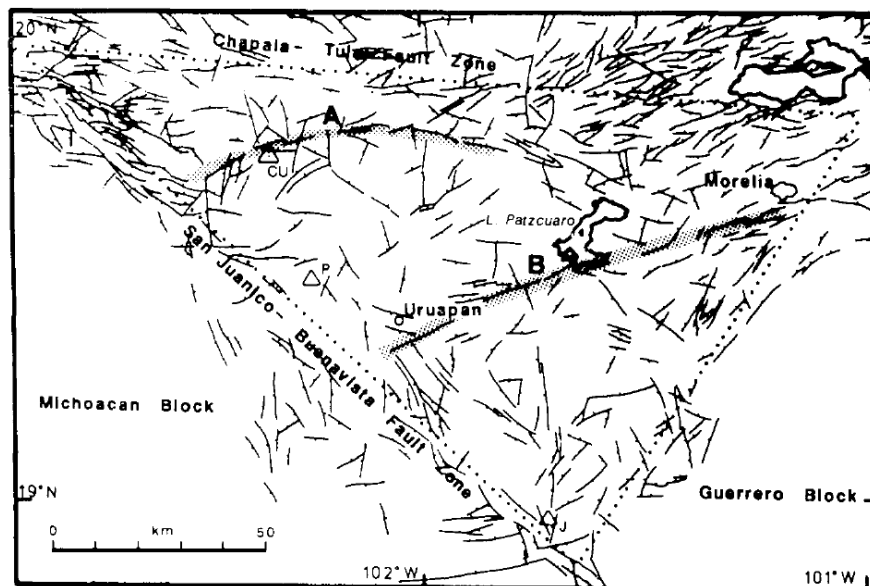


Figura 8. Distribución de escarpes de falla, orientados de manera heterogénea con líneas negras delgadas dentro de los límites del Triángulo Michoacán, el cual es delimitado por líneas punteadas que representan a las estructuras mayores: zona de falla San Juanico Buenavista, al oeste-suroeste; zona de falla Chapala-Tula, al norte y; zona de falla Mil Cumbres, al este-sureste. Al centro de la imagen con letras A y B se muestran dos grandes zonas de falla dentro del Triángulo Michoacán (Johnson y Harrison, 1990).

Connor (1987) estudia el CVMG a partir de lineamientos volcánicos y direcciones de fallas. Identifica zonas de falla con dirección NE-SO y NO-SE, mientras las fallas con dirección E-O son más comunes y se distribuyen más uniformemente. Los lineamientos volcánicos tienden a estar orientados E-O. Este autor explora también la concentración de volcanes y su relación con la estructura mediante un análisis de agrupamiento (*cluster analysis*), siendo pionero en su aplicación en el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. El análisis de agrupamiento de datos es una técnica de análisis de datos utilizada en diferentes campos del

conocimiento, la palabra *cluster* hace referencia a un agrupamiento de objetos, en el caso de su aplicación en la geología el análisis de *clusters* ha sido aplicado a los agrupamientos de centros eruptivos y naturalmente aplicado a los campos volcánicos. Connor (1990), en su estudio regional sugiere que se tienen dos grandes *clusters*, ambos elongados con dirección N35°, y que múltiples alineamientos volcánicos en la porción sur del campo poseen dirección N20° a N40°.

Gómez-Calderón (2021) menciona que el tema de agrupamientos volcánicos ha sido estudiado en el campo volcánico con dos enfoques: 1) en relación con los principales esfuerzos tectónicos (Hasenaka y Carmichael, 1985; Connor, 1987, 1990; Guilbaud *et al.*, 2011; Di Traglia, 2014; Cañón-Tapia, 2016) y 2) como herramienta para estimar espesores corticales (Mazzarini *et al.*, 2010; Pérez-López *et al.*, 2011)

3.4.5 Características petrológicas generales

Con relación a las características petrológicas del Campo Volcánico Michoacán Guanajuato, Hasenaka y Carmichael (1985) describen la composición de sus rocas representativas, en su mayoría de afinidad calciocalina. Las muestras presentan cambios composicionales progresivos con respecto a la distancia de la trinchera de Mesoamérica, con el mismo contenido de sílice la concentración de K₂O, P₂O₅ y Zr generalmente aumenta a mayor distancia de la trinchera. Por otra parte, el contenido de MgO, Cr y Ni disminuye a mayor lejanía de la trinchera, se empobrecen de estos elementos los volcanes más alcalinos y alejados de la trinchera.

Diversos trabajos han abordado aspectos petrológicos de algunas porciones del campo, sin embargo, ninguno con el alcance regional como el realizado por Hasenaka y Carmichael (1987) en donde se presentan análisis químicos realizados en alrededor de 200 volcanes del campo. Muestran que la mayoría de las lavas del campo contienen porcentajes en peso de SiO₂ entre 50-70% y se encuentran variedades alcalinas, calciocalinas y otros tipos transicionales. De acuerdo con sus resultados, a pesar del amplio rango composicional de los conos cineríticos (48-65% SiO₂), los volcanes tipo escudo y gruesos flujos de lava sin cono asociado están típicamente más enriquecidos en SiO₂. Especialmente, las lavas calciocalinas y transicionales ocurren a lo largo de todo el campo, pero, las lavas alcalinas altas y bajas en Mg tienen una distribución restringida, las primeras se encuentran en la zona sur y las

segundas en el norte del campo (Hasenaka y Carmichael, 1987). Acerca de las condiciones de formación de los magmas del campo, Hasenaka y Carmichael (1987) consideran que una baja tasa de suministro de magma es un factor importante para la generación de campos volcánicos. Periodos cortos de actividad volcánica sugieren la ausencia de una cámara magmática longeva, por lo tanto, procesos de fraccionamiento y mezcla a una gran escala y en profundidades someras son menos probables de ocurrir en el CVMG que bajo grandes volcanes compuestos con cámaras magmáticas someras (Hasenaka y Carmichael, 1987).

Para el estudio del Campo Volcánico Michoacán Guanajuato, los trabajos de Hasenaka y Carmichael (1985, 1987, 1994) siguen siendo un máximo referente. Las investigaciones relacionadas a su actividad volcánica no han cesado, pero estas han tendido a ser más locales, abarcando distintas porciones del campo y bajo diversos enfoques. Algunas de las zonas estudiadas de manera más local han sido la cuenca de Zacapu (Kshirsagar *et al.*, 2015; Mahgoub *et al.*, 2017; Reyes-Guzmán *et al.*, 2018), la Sierra del Tzirate (Pérez-Orozco *et al.*, 2018), la zona de Tacámbaro-Puruarán-Jorullo (Guilbaud *et al.*, 2011; Guilbaud *et al.*, 2012; Guilbaud *et al.*, 2020), el vulcanismo en la región del lago de Pátzcuaro (Osorio-Campo *et al.*, 2018; Ramírez-Uribe *et al.*, 2019), Valle de Santiago, (Losantos *et al.*, 2017), los complejos volcánicos del Águila y la Nieve (Cardona-Melchor, 2015), Tancítaro-Nueva Italia (Ownby *et al.*, 2011; Di Traglia *et al.*, 2014), el área de Queréndaro (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2020), la región volcánica graben de Cahulote de Santa Ana-Pedernales (Gómez-Calderón, 2021), en la zona norte de Morelia (Pola *et al.*, 2016; Cisneros-Máximo, 2016; Trujillo-Hernández, 2017; Avellán *et al.*, 2020; Hernández-Bernal *et al.*, 2021; Trujillo-Hernández *et al.*, 2022), entre otras.

3.5 Vulcanismo superior (Mioceno Tardío y Plioceno-Holoceno) de la Región de Morelia

Tras una revisión bibliográfica, se ha detectado que particularmente a partir del año 2015 se han publicado una serie de trabajos que describen la cronología eruptiva de diferentes porciones de la Región de Morelia. Estas publicaciones tratan acerca de las unidades volcánicas que generalmente se encuentran en una posición superior con respecto a la Sucesión volcánica del Oligoceno (?)-Mioceno Tafetán y Sierra de Mil Cumbres y la secuencia fluvio-lacustre de la Subcuenca Morelia-Charo y temporalmente se sitúan entre el

Mioceno Tardío y el Holoceno. Estas unidades volcánicas están mayormente relacionadas al Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. En este último apartado se resume la información más relevante (Figura 9).

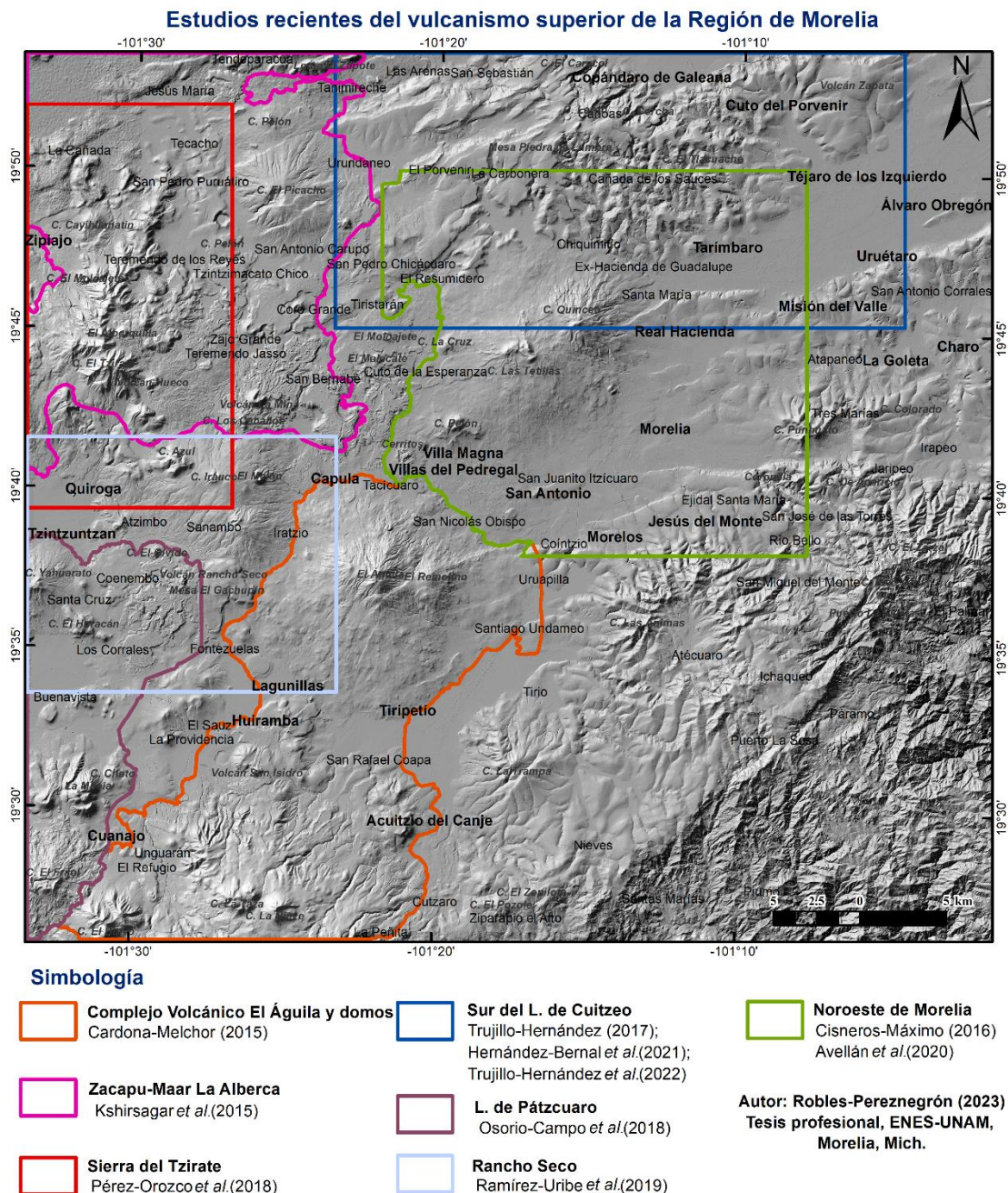


Figura 9. Áreas de estudio de diferentes publicaciones recientes (2015-2022) enfocadas principalmente al vulcanismo superior (Mioceno tardío y Plioceno-Holoceno) de la Región de Morelia. En la leyenda se indican las referencias.

Partiendo del evento volcánico más antiguo, en el límite noreste de la región y sur del lago de Cuitzeo sobresale el Volcán Zapata, un edificio volcánico de tipo escudo que sobreyace unidades volcánicas del Mioceno. Aunque estas unidades no son predominantes, representan eventos volcánicos que anteceden el vulcanismo del Plioceno-Holoceno del CVMG. Este vulcanismo ha sido fechado y presenta una edad de entre 6.75 a 8.11 Ma (Trujillo-Hernández, 2017).

En lo que respecta al CVMG, las edades más antiguas corresponden al Plioceno y se encuentran en dirección al suroeste del municipio de Morelia, en los límites con los municipios de Acuitzio, Huiramba, Lagunillas y Pátzcuaro. Cardona-Melchor (2015) estudia el complejo volcánico del Águila, el volcán tipo escudo más grande de la región, y el complejo de domos La Taza-La Nieve-El Burro. Su zona de estudio abarca un área de 450 km² y contabiliza un total de 34 estructuras volcánicas con un volumen emitido de 15.43 km³ y una tasa de emisión promedio para los últimos 2.9 Ma de 0.053 km³/10 ka. De acuerdo con este autor, el contenido de sílice en las rocas varía de 50.7 a 66.1 % en peso y predominan las andesitas, aunque también se identifican basaltos, andesitas-basálticas y dacitas. De acuerdo con sus resultados geoquímicos las muestras presentan una afinidad calcialcalina, producto de magmas formados en ambiente de subducción. Según las edades recopiladas y otras obtenidas por Cardona Melchor (2015) (la gran mayoría) la actividad volcánica en esta zona inició durante el Plioceno con el domo Zoromuta (3.8 ± 0.9 Ma), lava Lagunillas y domo La Granja (2.97 ± 0.05 Ma) y domo El Divisadero y domo San Rafael Coapa (2.6 ± 0.07 Ma). En el Pleistoceno la actividad inicia con el surgimiento del cono La Trampa (2.0 ± 0.05 Ma) y continua cronológicamente con los domos Santa Genoveva (1.88 ± 0.02 Ma), domos La Yerbabuena (1.6 ± 0.06 Ma), Cerro Blanco (1.47 ± 0.03 Ma), Cerro Unguarán (1.47 ± 0.01 Ma), Zimbicho (1.33 ± 0.03 Ma), Cerro Iratzio (1.0 ± 0.01 Ma), El Águila (0.72 ± 0.08 Ma), domos El Burro (0.70 ± 0.08 Ma), Cerro Piedra Gorda (CFE, 1985, en Cardona-Melchor, 2015), El Remolino (0.62 ± 0.02 Ma) (Gómez-Vasconcelos et al., 2015), Cerros La Arena y La Reunión, domos La Taza (0.37 ± 0.12 Ma), cono Los Puercos (0.37 ± 0.02 Ma), Cerro Guadalupe (0.13 ± 0.61 Ma), domo La Nieve (0.88 ± 0.036 Ma), conos Cuanajo ($28,290 \pm 160$ años AP) y culmina con la construcción del cono San Isidro hace $21,490 \pm 90$ años AP.

Kshirsagar *et al.* (2015) trabajan en la zona noroeste del municipio de Morelia en donde se ubica el *maar* La Alberca, el único volcán de este tipo en la región, aportando una serie de fechamientos, estratigrafía y la cartografía más completa de la zona. Explora las condiciones geológicas que permitieron el surgimiento del vulcanismo freatomagmático y cómo este tipo de actividad puede ser usada como indicador paleoclimático. El vulcanismo de esta zona ha sido abordado también por Siebe *et al.* (2014) y desde un punto de vista de riesgo sísmico por Soria-Caballero *et al.* (2019 y 2021). De acuerdo con Kshirsagar *et al.* (2015) la zona es caracterizada por un sistema de fallamiento normal activo estilo dominó que se asocia al Sistema de Fallas Morelia-Acambay y sigue una tendencia de fallas con dirección N65°E a N85°E. De acuerdo con los mismos autores, las rocas más viejas de la zona pertenecen al Plioceno y corresponden a los flujos de La Leonera (4.526 Ma) al norte del área de estudio, del Pleistoceno Temprano corresponden el volcán tipo escudo Picacho y (1.557 Ma), Cerro Pelón (1.545 Ma), el cual forma parte del basamento del *maar* La Alberca de Teremendo, y un depósito de ignimbritas (1.462 Ma) ubicadas en las localidades de El Durazno y La Cañada. Al Pleistoceno Medio corresponden el domo El Caracol (1.282 Ma) y el domo de El Tzirate (961 ka), que forman parte de la Sierra del Tzirate, y el cerro Coro Grande (347 ± 13 ka). Al Pleistoceno Tardío pertenecen el *maar* La Alberca (20,275 + 820/-745 y 22,350 + 525/-495 años AP), el cono Molcajete de Zipiajo (14,710+350/-335 años AP) y Cerro Hueco (12,570±110 años AP). Por último, la actividad más reciente corresponde al cono La Mina, del cual se obtuvieron 5 fechamientos (10,020+230/-225, 9690+145/-140, 9285+140/-135, 7325±135, y 7045 + 125/-120 años AP) y los flujos de lava de Tendeparacua (6,150 años).

La evolución geológica del vulcanismo circundante al lago de Pátzcuaro, abarcando una pequeña porción del vulcanismo al oeste y suroeste de la Región de Morelia, es abordada por Osorio-Ocampo *et al.* (2018). Plantean cartografía, estratigrafía y nuevos fechamientos, con la identificación de 45 estructuras volcánicas entre las cuales se encuentran volcanes tipo escudo (5), conos cineríticos (25), domos de lava (10), flujos de lava asociados a conos (2), un derrame fisural y dos complejos volcánicos en un área de 560 km² (Figura 14). De acuerdo con estos autores el vulcanismo en dicha zona inició su actividad durante el Plioceno, hace 3.9 Ma con actividad predominantemente efusiva hasta hace 0.1 Ma que fue seguida por un aparente hiatus entre 0.1 y 0.04 Ma y que se correlaciona con el desarrollo de una gruesa capa de suelos de color anaranjado que se observa en varias localidades. Posteriormente un

intenso periodo de vulcanismo prevalece hasta el Holoceno. Con respecto a la composición de las rocas mencionan que predominan las andesitas (76%) seguido por basaltos-andesíticos (~12 vol. %), dacitas (~9 vol. %) y basaltos (~3 vol. %), con contenidos de sílice entre 47.6-65.3 wt %. Reportan una tasa de emisión de magma de $0.02 \text{ km}^3/\text{ka}$ y un mínimo volumen total de magma de $\sim 20 \text{ km}^3$ y consideran que el estilo eruptivo más frecuente es el estromboliano. De las estructuras volcánicas estudiadas por Osorio-Ocampo *et al.* (2018) se tienen algunas en común con la Región de Morelia, estas son, en orden cronológico; El Huracán ($1.042 \pm 0.026 \text{ Ma}$), cono Buenavista ($0.880 \pm 0.094 \text{ Ma}$), El Olvido ($0.502 \pm 0.072 \text{ Ma}$), Cerro Chato ($0.497 \pm 0.046 \text{ Ma}$) y complejo volcánico La Muela (32590 ± 230 , 18010 ± 70 y 12740 ± 50 años AP). Acerca del complejo volcánico La Muela, consideran que se trata de un complejo construido por varios eventos eruptivos, por lo tanto, no lo consideran un volcán monogenético. También se reporta un fechamiento del volcán tipo escudo El Frijol de 3230 ± 30 años AP, sin embargo, su morfología es evidentemente más vieja y se cita una edad del Pleistoceno Tardío $\sim 60 \text{ ka}$ (comunicación personal, C. Siebe, en Osorio-Ocampo *et al.* 2018). García-Quintana *et al.* (2016) realizan una datación arqueomagnética del volcán El Frijol y obtienen una edad de 3906 años A.P., lo cual concuerda con la estimación de Osorio-Ocampo (2014).

Pérez-Orozco *et al.* (2018) investigan la relación del campo de esfuerzos con el magmatismo máfico y félsico de la Sierra del Tzirate. La sierra del Tzirate se localiza en el límite oeste de la Región de Morelia, se trata de una sierra formada por una serie de domos andesíticos a dacíticos alineados en dirección NE-SO y NO-SE afectados por el fallamiento normal activo del Sistema de Fallas Morelia-Acambay (Pérez-Orozco *et al.*, 2018). En la cartografía elaborada por estos autores se plasman 7 unidades; la primera ubicada en la porción NNO del área de estudio y se trata de depósitos de ignimbrita. La segunda unidad es representada por 2 conos, 1 volcán tipo escudo, 1 flujo de lavas y 1 depósito de ignimbritas que se distribuyen al norte y sureste de la sierra; la unidad es representada temporalmente por el cerro Caracol, un domo dacítico para el cual obtienen una edad de $1.24 \pm 0.63 \text{ Ma}$. La tercera unidad se distribuye en el centro y este de la sierra y consiste en 5 domos; la cuarta unidad está constituida por domos dacíticos, Cerro Azul ($0.990 \pm 0.21 \text{ Ma}$) y Cerro El Tzirate ($0.930 \pm 0.25 \text{ Ma}$); la quinta unidad esta compuesta por domos dacíticos y conos basalto-andesíticos del Pleistoceno Medio; la sexta unidad está formada por una serie de conos y el maar La

Alberca de Teremendo. La última unidad corresponde a conos de composición andesita-basáltica probablemente del Pleistoceno Superior-Holoceno.

Estructuralmente la Sierra del Tzirate es dislocada en su parte norte por fallas normales con componente lateral izquierdo y dirección ENE-OSO del Sistema de Fallas Morelia-Acambay. Por otro lado, en la porción sur prevalecen los alineamientos de estructuras volcánicas y fallas normales con direcciones NE-SO y NO-SE (Pérez-Orozco *et al.* 2018). Para estos autores, el vulcanismo y el fallamiento de la Sierra del Tzirate ocurre en una zona transtensional, donde el vulcanismo félsico está localizado en zona de relevo con dirección NNE-SSO y el vulcanismo máfico se localiza en fallas con dirección NE-SO y NNE-SSO y la contemporaneidad del vulcanismo máfico del CVMG y félsico de la Sierra del Tzirate es explicado como resultado de la variación en la configuración del campo de esfuerzos. Una zona transtensional genera esfuerzos con áreas de compresión y extensión. La compresión ocasiona que el magma sea atrapado en la corteza superior favoreciendo procesos de asimilación y diferenciación del magma. Por otro lado, las zonas extensionales permiten un rápido ascenso de magmas desde reservorios profundos donde se ubican los magmas máficos a intermedios (Pérez-Orozco *et al.* 2018).

Ramírez-Urbe *et al.* (2019) estudian los conos cineríticos de Rancho Seco, al oeste de la Región de Morelia y sureste de Quiroga, estudian su vulcanismo, y exploran la relación que tuvieron los habitantes del imperio Tarasco en el actual sitio arqueológico de Angamuco con el malpaís de Rancho Seco. Esta población se asentó sobre la base de uno de sus flujos distales, contiguo al lago de Pátzcuaro, adaptándose a la aparente inhospitalidad del terreno. Estos autores mencionan la acelerada actividad de explotación de materiales volcánicos que amenazan la preservación de sitios arqueológicos, como el de Angamuco, y la destrucción de sus icónicos conos volcánicos y sus paisajes; hacen un llamado a la creación de nuevos marcos regulatorios para la preservación del patrimonio natural y cultural asociado a estos sitios.

Para la zona de Rancho Seco, Ramírez-Urbe *et al.* (2019) identifican 26 volcanes en un área de 260.15 km² y un volumen emitido de magma de ~20.6 km³. Para esto realizan una cartografía que incluye otros centros volcánicos circundantes que ya han sido estudiados por otros autores (Nixon *et al.*, 1987; Ban *et al.* 1992; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018), realizan

nuevos fechamientos para los volcanes Rancho Seco ($27,846+445/-425$ años AP) y El Melón ($12,415\pm 90$ y $11,470\pm 170$ años AP) y presentan petrografía y análisis químicos. Los flujos del cono Rancho seco presentan un contenido de sílice de 58.5-60.6 wt% y El Melón de 55.2-55.9 wt%. Más recientemente Ramírez-Uribe *et al.* (2021) realizan un estudio petrogenético enfocado al volcán Rancho Seco.

El complejo volcánico Quinceo-Tetillas, al centro de la Región de Morelia y delimitando la zona urbana del noroeste de la ciudad de Morelia ha sido estudiada por Avellán *et al.* (2020). Estudian un conjunto de 12 volcanes monogenéticos emplazados al noroeste de la ciudad de Morelia, localizado en el límite oeste de la región del Sistema de Fallas Morelia-Acambay. Presentan nuevas edades, análisis químicos, análisis estructural y cartografía geológica a escala 1:25000. El último evento del Mioceno es asignado al domo La Cruz (6.681 ± 0.073 Ma), ubicado al oeste de los derrames del volcán tipo escudo Tetillas y rodeado por los flujos de este último. Siguiendo con la geocronología eruptiva, la actividad volcánica del Plioceno es representada por las lavas de Cuto (3.724 ± 0.057 Ma), domo Divisadero (3.144 ± 0.060 Ma) y domo El Estadio, este último sin fechamiento, pero se infiere que pertenece a esta época. Durante el Pleistoceno la actividad inicia con el surgimiento del volcán en escudo Quinceo (1.365 ± 0.010 y 1.355 ± 0.017 Ma), seguida por el cono de escoria Pelón (0.844 ± 0.099 Ma), volcán en escudo Tetillas (0.562 ± 0.078 Ma) con sus dos edificios somitales, un domo (0.346 ± 0.009 Ma) y un cono cinerítico (0.336 ± 0.008 Ma), seguido por los conos Jamanal y Parastaco, de los cuales no se tiene edad absoluta pero se interpreta por relaciones estratigráficas, y por último los flujos de lava Cerritos (0.114 ± 0.029 y 0.138 ± 0.037 Ma). Los domos y flujos de lava del Mioceno Tardío-Plioceno tienden a ser más diferenciados y andesíticos, mientras que los conos, flujos y volcanes tipo escudo del Pleistoceno son de composición basáltico-andesítica a andesítica a excepción de las lavas Cerritos que son basálticas (Avellán *et al.*, 2020). También mencionan que todos los volcanes monogenéticos del noroeste de Morelia tienen una firma geoquímica típica de arco volcánico continental asociada a ambientes de subducción.

En cuanto al análisis estructural realizado por Avellán *et al.* (2020), esta zona es afectada por dos sistemas de fallas. El primero consiste en un sistema extensional E-O a ENE-OSO que genera fallas normales con dirección NNO-SSE y fallamiento lateral izquierdo con dirección ENE-OSO a E-O que solo afecta a las unidades del Mioceno Temprano. El segundo

corresponde a un sistema extensional N-S a NNO-SSE que genera fallas normales E-O a ENE-OSO con componente lateral izquierdo asociadas al Sistema de Fallas Morelia-Acambay y afecta a las rocas del Mioceno, así como a las unidades del Plioceno-Pleistoceno. Sugieren que la distribución de los centros eruptivos, estilos eruptivos y el volumen magmático de la zona son probablemente controlados por la tectónica regional.

Por otro lado, tratándose de un evento volcánico con un estilo eruptivo de rara ocurrencia en el Campo Volcánico Michoacán Guanajuato, al norte y este de la región de Morelia se ha estudiado un evento de erupción tipo pliniana con edad del Pleistoceno. Este evento se caracteriza por ser un depósito de caída que se encuentra coronando diversas unidades de la región, principalmente en la porción oriente, donde el vulcanismo más reciente es nulo. Su origen era desconocido, sin embargo, recientemente se han planteado hipótesis acerca de su fuente. Esta secuencia de pómez de caída de color amarillo fue descrita por Israde-Alcántara (1995) con el nombre de depósitos Alegría debido a su semejanza con el dulce tradicional mexicano del mismo nombre. El depósito se pone en contacto con las andesitas de la Sierra de Mil Cumbres en la zona de Ocolusen en Morelia, sobre andesitas, ignimbritas y depósitos lacustres en la loma de Tarímbaro, del Club Erandeni y de Atapaneo (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2004). Kshirsagar *et al.* (2015) describen una ignimbrita de 1.462 Ma al norte de la Alberca que puede ser correlacionable con la pómez Alegría, fechada al norte del complejo volcánico Quinceo-Tetillas por Cisneros-Máximo (2016) con una edad de 1.4 Ma. Por su parte, Avellán *et al.* (2020) obtienen una edad de 1.48 Ma para esta unidad.

Gómez-Arango (2019) en un trabajo de tesis orientado a develar el origen de este depósito, por medio de levantamiento estratigráfico, fechamientos, análisis granulométrico y mapas de isopacas e isopleas propone la distribución espacial de este depósito y sugiere que este proviene de la cuenca de Zacapu, específicamente del graben de Huaniqueo, en el margen noroeste de la Región de Morelia. Probablemente esta estructura facilitó el ascenso de magma y generó vulcanismo de tipo fisural desencadenando erupciones muy explosivas, asociadas al colapso de una caldera en la zona (Gómez-Arango, 2019).

IV. PROBLEMÁTICAS GEOLÓGICO-AMBIENTALES DE LA REGIÓN DE MORELIA

Muchos estudios geológicos realizados en la Región de Morelia han abordado problemáticas ambientales y de peligro geológico. En estos estudios se hacen descripciones geológicas locales, las cuales raramente presentan una cartografía actualizada, por lo que generalmente reciclan y copian datos sin una evidente verificación de campo. Caben destacar los trabajos que han sido más citados en cuanto a la descripción geológica de la ciudad de Morelia (Garduño-Monroy *et al.*, 1999a y 1999b, Garduño-Monroy *et al.*, 2001; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2004). En estos estudios se presentan temáticas como: a) problemática geológico-ambiental de la ubicación de los vertederos de basura (Buenrostro *et al.*, 2001; Buenrostro *et al.*, 2003; Israde y Buenrostro, 2009), b) procesos de remoción en masa (Hernández-Madrugal, 2001; Arreygue-Rocha *et al.* 2002; Hernández-Madrugal *et al.*, 2004; Pola-Villaseñor *et al.* 2006), c) riesgos hidrológicos (Arreygue-Rocha, 1998; Arreygue-Rocha *et al.*, 2004; Hernández y Vieyra, 2010; Arreygue-Rocha *et al.*, 2012), d) las fallas geológicas de Morelia (Garduño-Monroy *et al.*, 1998, 1999b y 2001; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2004; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006; Ávila-Olivera, 2008). En la conclusión de estas problemáticas prevalece un factor común: la falta de una adecuada evaluación geológica y geomorfológica en la planeación territorial de la ciudad y el municipio de Morelia. A continuación, se describen brevemente las problemáticas geológico-ambientales más destacadas; y de manera introductoria un breve apartado sobre la historia y las tendencias del crecimiento urbano de la ciudad de Morelia, tema fundamental para comprender las problemáticas de la región.

4.1 La ciudad de Morelia: historia y tendencias de expansión urbana

La ciudad de Morelia está ubicada en la porción centro oriental de la zona de estudio, es el centro urbano más importante de la región y capital del estado de Michoacán. Posterior a la conquista de México (1521) se inicia un proceso paulatino de construcción de las ciudades de la Nueva España. Entonces, la ciudad emerge en 1541 como una imposición metropolitana

que define y delimita su relación con el conjunto del territorio conquistado (Vargas-Uribe, 2014). En una zona caracterizada por un clima templado, ocurrencia de ríos, abundancia de bosques, amplios espacios de cultivo y disponibilidad de proteína animal es en donde se crea la antigua ciudad de Valladolid. De acuerdo con Vargas-Uribe (2014) esta es fundada en 1541 sobre la loma de Guayangareo por órdenes del virrey Don Antonio de Mendoza, y cambia su nombre a Morelia en 1828 después de la independencia nacional. El sitio fundacional se ubicó sobre una loma chata y suficientemente elevada con respecto a los principales ríos que atraviesan la ciudad: río Chiquito y río Grande. De esta manera se evitaban de manera consciente y ordenada los riesgos por inundaciones. Actualmente este sitio se localiza en la zona centro de la mancha urbana, en el actual centro histórico, que visto desde una imagen satelital se puede diferenciar de la expansión urbana contemporánea (gris y caótica) por su característico tono rosado-rojizo que viste a los edificios de arquitectura colonial siguiendo un trazo urbano cuadrangular (Figura 10 y 12).

Con respecto a los patrones de expansión urbana, de acuerdo con Vargas-Uribe (2014), se pueden diferenciar claramente dos etapas en la urbanización de Morelia. La primera y más larga (1541-1960) estuvo caracterizada por la expansión ordenada de una ciudad que mantenía un proyecto de traza urbana ortogonal, dibujando calles perpendiculares de manera similar a un tablero de ajedrez. La segunda etapa se caracteriza por una traza urbana que refleja territorialmente, no un proyecto de ciudad, sino los intereses particulares, tanto de los especuladores urbanos legalmente conformados, como de los fraccionadores irregulares (Vargas-Uribe, 2014). De acuerdo con el mismo autor, la explosión demográfica en ciudades medias como Morelia fue influenciada por las políticas de descentralización y disparada por la migración de personas después del sismo de 1985 con epicentro en Lázaro Cardenas que afectó severamente la ciudad de México. El cambio de uso de suelo más importante de 1960 a 1990 fue el crecimiento de la superficie urbana de la ciudad de Morelia, al haber aumentado en un 506% (López-Granados *et al.*, 2001). Esta etapa es asociada, primeramente, a una traza urbana anular, originada en la década de 1960 a partir de la construcción del periférico de Morelia (libramiento), que rodea de forma circular a toda la ciudad. A partir de 1994 se convierte en una traza radial (expansión radial), que es articulada por las principales carreteras federales que se comunican con la ciudad (Salamanca, Zinapécuaro, Pátzcuaro, Charo, Mil Cumbres) (Figura 11).



Figura 10. En esta imagen tomada de Google Earth (2022) se muestra el primer cuadro de la ciudad de Morelia con su distintivo color rosado que sobresale del resto de la ciudad y se eleva entre 1900-1940 m s.n.m. con respecto a los ríos rectificadas que rodean la loma, río Grande (norte) y río Chiquito (sur).

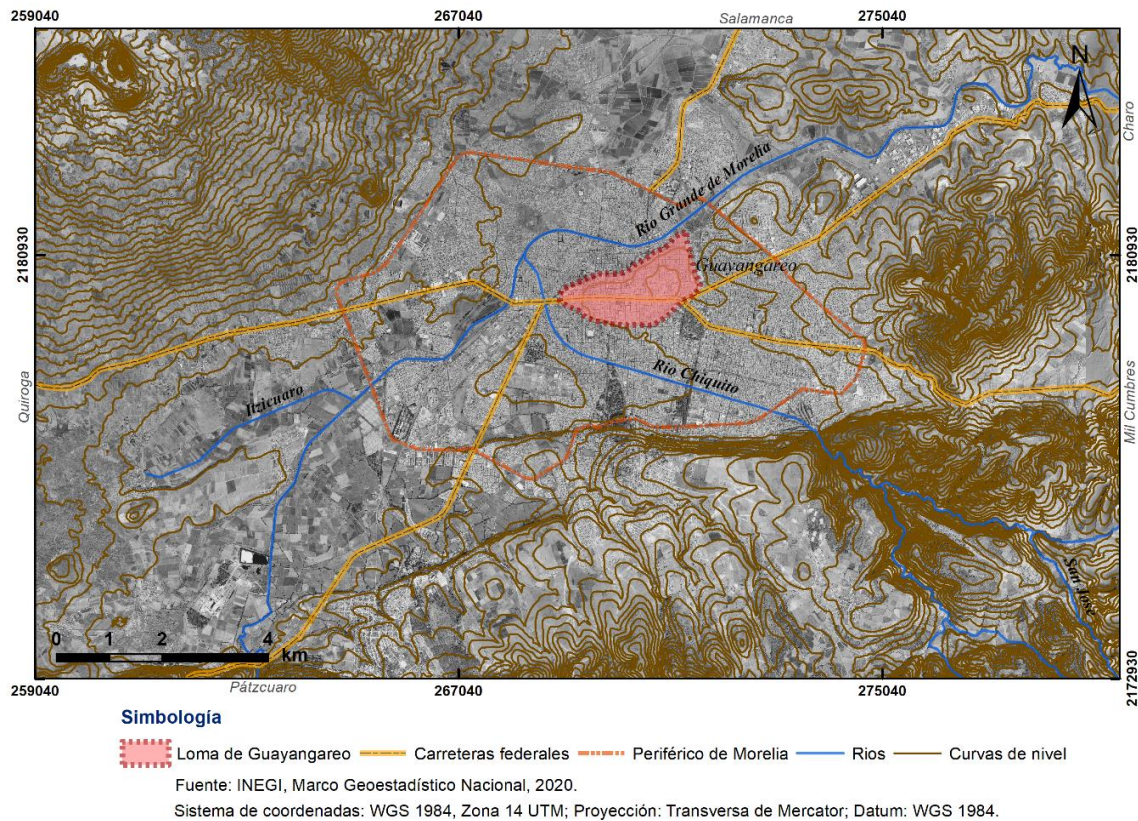


Figura 11. En la figura se delimitan los principales elementos que articulan la expansión de la ciudad. Al centro se delimita con color rosa la elevación topográfica de la loma de Guayangareo (sitio de la fundación de

Morelia), la cual es rodeada por los ríos Grande y Chiquito. Rodeando a la ciudad se dibuja el periférico de Morelia con color anaranjado y con color amarillo se delimitan las carreteras federales que comunican a la ciudad y hacia donde la ciudad tiende a expandirse radialmente. En la imagen también se pueden distinguir algunos elementos orográficos importantes; al noroeste el C. Quinceo; al este el C. Punhuato y al sur-sureste la porción norte de la caldera de Atécuaro.

Actualmente, la expansión indiscriminada de la ciudad enfrenta problemáticas ambientales y geológico-ambientales preocupantes. De manera representativa se puede señalar la expansión urbana que se desarrolla particularmente en la porción sureste y oeste de la ciudad. En la zona suroriente de Morelia se encuentra el sector de mayor importancia ambiental para la ciudad, denotado por la concentración de Áreas Naturales Protegidas y uno de los sitios con mayor biodiversidad del municipio. Es una zona donde la fuerte presión ejercida por la expansión urbana absorbe a las localidades rurales para la construcción de grandes complejos habitacionales y comerciales orientados a personas de poder adquisitivo medio-alto. Esto último, impulsado principalmente por las dos corporaciones empresariales más importantes de la ciudad, Organización Ramírez y Grupo FAME, con los proyectos inmobiliarios Ciudad Tres Marías y Altozano, representando un fenómeno de segregación residencial sin precedentes en Michoacán (Sánchez-Sepúlveda y Urquijo-Ortiz, 2014). Con la finalidad de comunicar un centro comercial con una mayor densidad de población, en el 2007 se comenzó a gestionar una mega obra de vialidades que fue construida atravesando una falla geológica regional considerada sísmicamente activa (Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Suter, 2016) y un Área Natural Protegida que fue legalmente modificada el 31 de diciembre de 2009 para este fin específico (Sánchez-Sepúlveda y Urquijo-Ortiz, 2014; Ávila-García, 2014). En el año en curso de esta tesis (2022), en la misma zona, se ha anunciado el inicio de los estudios para la construcción de un megaproyecto de presas anunciado por el gobierno estatal, lo cual ya ha sido debatido por expertos de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y la Universidad Nacional Autónoma de México, siendo calificada como una obra ecológicamente inviable e hidrológicamente injustificada.

Por otra parte, y de manera contrastante, en la zona occidental de Morelia se encuentra el fraccionamiento de interés social más grande del estado, Villas del Pedregal (Espinosa-Ortiz, 2015). Este desarrollo habitacional se comenzó a construir en el año 2006 por el Grupo Inmobiliario Herso, y es un claro ejemplo de la expansión urbana radial que menciona Vargas-Urbe (2014). El fraccionamiento se encuentra en la periferia de la ciudad y se accede por la carretera federal 15 (Morelia-Quiroga). Empresas como esta, para reducir costos e

incrementar utilidades, construyen viviendas pequeñas, con materiales económicos y en terrenos pequeños y alejados de la ciudad, donde los precios de suelo son más baratos, en detrimento de la calidad de vida de sus habitantes (Espinosa-Ortiz *et al.*, 2015).

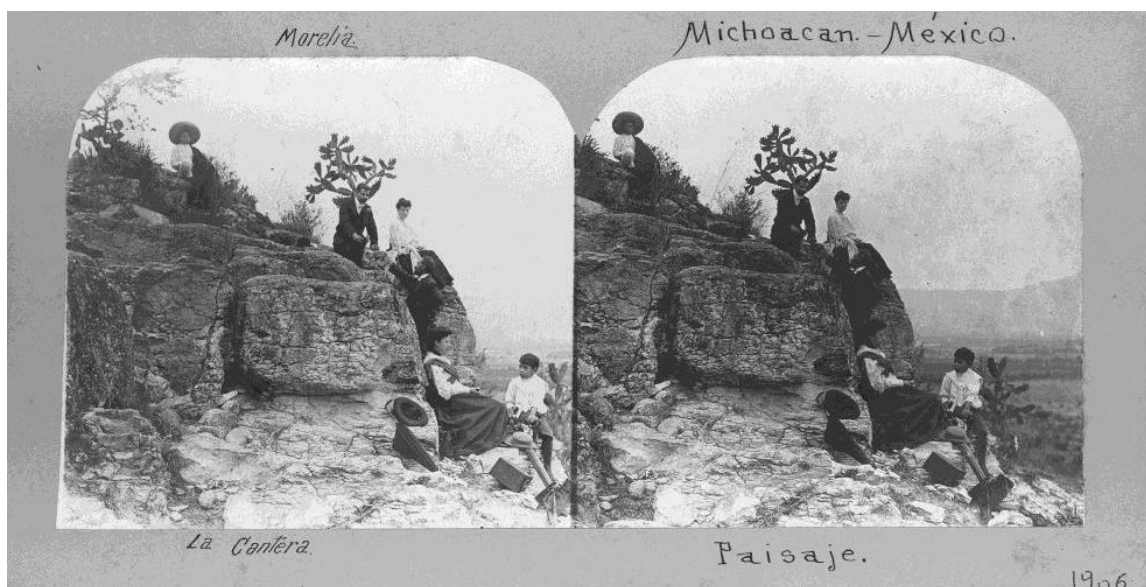


Figura 12. Fotografía antigua de autor desconocido, tomada en 1906 donde se observan personas posando sobre una loma de ignimbrita en Morelia, probablemente en la loma del Zapote, contigua a la loma de Guayangareo. Actualmente este sitio se encuentra totalmente urbanizado y es ocupado por la colonia Obrera.

4.2 Ubicación de los tiraderos de basura de Morelia

Buenrostro e Israde (2003) manifiestan la problemática ambiental que existe en torno a el aumento poblacional acelerado en el municipio de Morelia el cual está relacionado con el también acelerado aumento de desechos urbanos cuyo mayor sitio de disposición es inadecuado. Este sitio se ubica al oeste de la ciudad de Morelia, en el costado oeste de los conos cineríticos Jamanal y Cerritos, al suroeste del cerro Pelón, Tetillas y Quinceo, todos estos alineados en dirección NE-SO, paralelos a un sistema de fallamiento regional.

Por medio de evaluaciones geológicas y geofísicas tales como perforaciones y prospección geofísica, Israde-Alcántara *et al.* (2009) realizan una caracterización geológica de la zona donde se ubica el tiradero municipal de Morelia. En esta se reconoce un terreno altamente permeable constituido por productos piroclásticos y lavas fracturadas, mientras el método de georadar revela fallas y fracturas con dirección NE-SO que proveen posibles conductos para la infiltración de lixiviados. Cerca de la zona se ubican pozos de agua de consumo humano, lo cual supone un riesgo para la población cercana que la consume, aunado a esto los análisis

geoquímicos del agua de los pozos cercanos muestran concentraciones de Cd, Pb, Zn, Ni, Cr, As y contaminantes orgánicos (fenoles) por encima de los estándares de calidad internacionales para el agua de consumo humano, se hipotetiza que estos contaminantes tienen su origen en los desechos del tiradero municipal (Israde-Alcántara *et al.*, 2009). También señalan otro problema de la gestión de este sitio relacionado con el material utilizado para recubrir las capas de los desechos, ya que se hace uso del mismo material volcánico poroso y permeable de la zona como arenas y pómez. Para esto recomiendan el uso de material arcilloso dadas sus características fisicoquímicas capaces de atrapar las moléculas contaminantes, el cual puede ser extraído del sureste de Morelia. En suma, los autores recomiendan reubicar y reestructurar el tiradero municipal.

4.3 Procesos de remoción en masa

Los procesos de remoción en masa han sido estudiados en el municipio de Morelia con énfasis en dos zonas al sur de la ciudad de Morelia, la primera corresponde a la localidad rural de San Miguel de Monte, en la parte superior de la cuenca receptora del Río Chiquito y la segunda se ubica en la zona urbana de Morelia a lo largo de la falla Morelia o también llamada La Paloma, una falla geológica con dirección E-O y un escarpe con altura aproximada de 200 m. Esta falla se expresa con una prominente mesa que representa un alto estructural perteneciente a un sistema activo de fallamiento normal que deforma el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana, este segmento de falla es considerado de alto peligro sísmico (Suter, 2016).

En San Miguel del Monte, el proceso de remoción en masa ha sido detectado desde la década de los noventa, provocando deformaciones que van en aumento, afectando obras civiles y generando nuevos escarpes, agrietamientos, lóbulos de deslizamiento, troncos de pinos inclinados y árboles derribados o secados como producto de la mutilación de sus raíces (Hernández-Madrugal, 2001; Hernández-Madrugal *et al.*, 2004). Estos mismos autores resaltan algunos factores que han dado lugar al proceso de remoción en masa de San Miguel del Monte: i) la argilización de los productos piroclásticos de la ladera inestable, definiendo así un comportamiento plástico que en años de baja precipitación se resecan y contraen formando agrietamientos que sirven de acceso para el flujo de agua superficial que posteriormente ocasiona un exceso de saturación y consecuente deformación, ii) la erosión

lateral provocada por un arroyo en el margen oeste de la ladera que ha generado un gran canal de erosión que propicia coladas de detritos y deslizamientos rotacionales, iii) la inclinación desfavorable de los estratos del subsuelo, iv) la presencia de movimientos pasados, v) cambios extremos en el régimen de precipitaciones anuales, tales como periodos prolongados de sequía seguidos por altos valores de precipitación, como sucedió en el año 1983, y v) acciones antrópicas como tala la de árboles, el pastoreo y las excavaciones.

Por otra parte, a lo largo de la falla La Paloma han sido caracterizados principalmente dos cuerpos inestables, el deslizamiento de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) y el del Campestre, pero también se reportan pequeños cuerpos inestables en el área de Ocolusen (Figura 13; Arreygue *et al.*, 2002). El primero es el de mayor dimensión con 600 m de largo, 400 m de ancho y 40 m de espesor, mientras el del Campestre presenta 250 m de largo, 400 m de ancho y 30 m de espesor (Arreygue *et al.*, 2002). Los movimientos de estos taludes son de tipo rototraslativos y de caída de bloques y mencionan que las condiciones de riesgo en esta zona pueden provocar que los edificios sean afectados directamente al estar situados sobre la trayectoria de movimiento o bien por la remoción de bloques de la parte alta del escarpe.

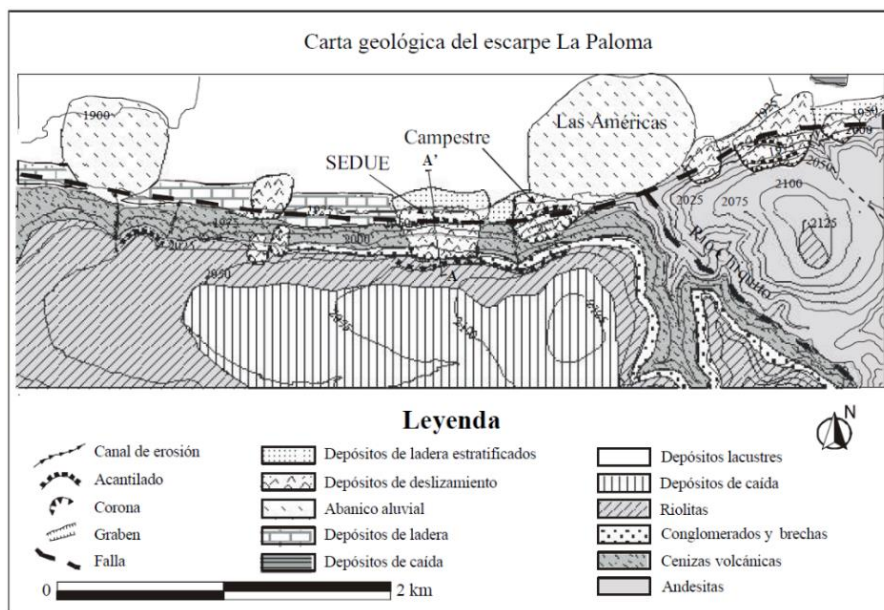


Figura 13. Carta geológica del escarpe La Paloma, al sur de Morelia (Arreygue *et al.*, 2002).

Pola-Villaseñor *et al.* (2006) señalan las condiciones de inestabilidad dentro del parque Franciso Zarco en el sector de Ocolusen, también al sur de Morelia, donde los procesos

gravitacionales iniciaron con la construcción de un camino de acceso a un fraccionamiento ubicado en la parte alta del escarpe, los cuales se agravaron con las lluvias y generaron flujos de detritos, caídas y volcamiento de rocas y movimientos traslacionales. Mencionan que un año después del inicio de la inestabilidad el gobierno del estado de Michoacán construyó un muro de contención; sin embargo, estudios de monitoreo muestran desplazamientos de 50 cm en sus tres dimensiones en un lapso de 6 meses, indicando así un diseño deficiente.

4.4 Riesgos hidrológicos

De acuerdo con datos de Hernández y Vieyra (2010), para ese momento, el 31% de la población de Morelia muestra problemas de inundaciones. Dividen a la ciudad de Morelia en tres contornos urbanos, central, periferia inmediata y periferia exterior, en donde el contorno central es el más afectado por inundaciones, pero la periferia inmediata y exterior debido a sus condiciones más precarias se vuelven más susceptibles a inundaciones, con costosas y lentas recuperaciones (Figura 14).

Hernández y Vieyra (2010) coinciden en que la ciudad de Morelia sufre una expansión indiscriminada que ha ocasionado que se ocupen suelos sin vocación urbana, presentando problemas de inundaciones, principalmente relacionados a las cercanías con los ríos Grande y Chiquito. La ciudad de Morelia es atravesada de este a oeste por el río Grande y se une en la ciudad con el río Chiquito, proveniente del sureste de Morelia con dirección NO-SE. Los cauces de ambos ríos han sido modificados en el pasado, circunstancia que se ha traducido en un aumento de la frecuencia de desbordamientos en zonas que correspondían a antiguos cauces y que ahora están ocupadas con viviendas e infraestructuras (Arreygue *et al.*, 2012). Los problemas de inundaciones representan una conjunción de varios factores, uno fundamental es referente a los valores de precipitación, sin embargo, sobre esto Hernández y Vieyra (2010) concluyen lo siguiente:

Los registros de precipitación mantienen cierta homogeneidad en la serie de tiempo estudiada, manifestando que es un elemento fundamental en la formación de inundaciones, pero no es la principal causa del desastre. De tal forma, uno de los factores principales que incrementan la formación del riesgo es el constante crecimiento del área urbana, el cual viene precedido del incremento demográfico, las condiciones de precariedad de la población, el incumplimiento de reglamentos y la

carencia de una planeación adecuada que evite los asentamientos sobre zonas no aptas para uso urbano. (p. 61)

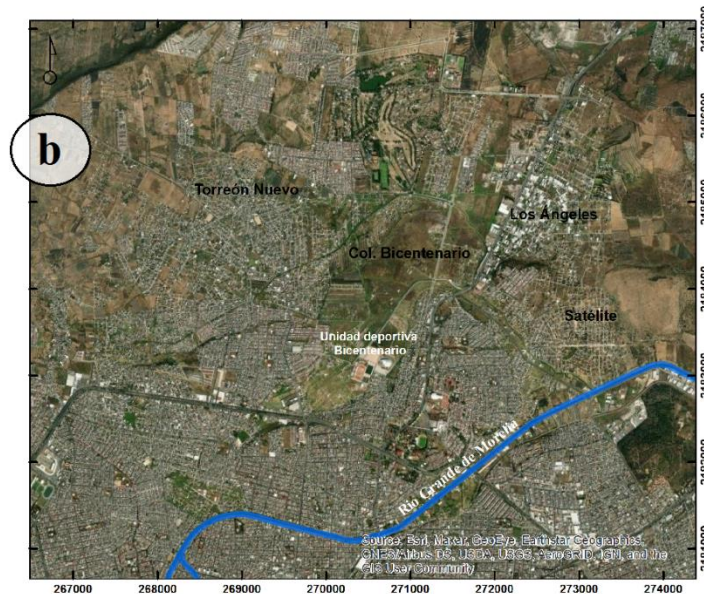
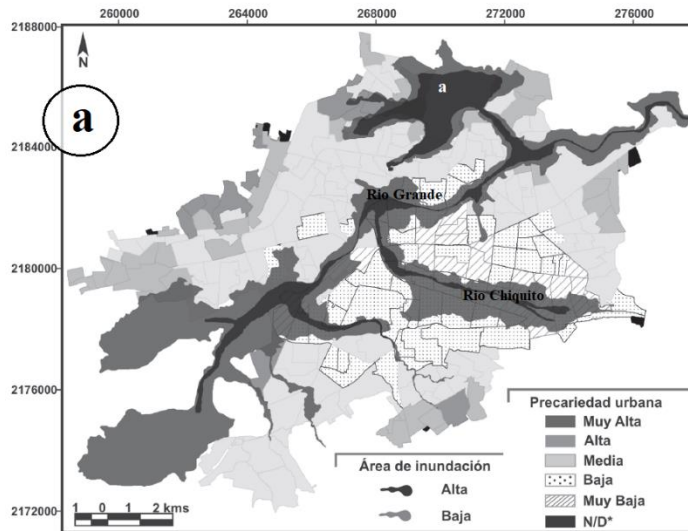


Figura 14. a) Mapa de las áreas susceptibles a inundaciones en el polígono urbanizado de la ciudad de Morelia y su relación con la precariedad urbana. Nótese que las zonas susceptibles con forma lineal que atraviesan la ciudad corresponden a los ríos Grande y Chiquito; al norte de la ciudad, la zona inundable con área más extendida marcada con la letra a se ubica en la colonia Bicentenario (modificado de Hernández y Vieyra, 2010). b) Imagen satelital (Google Earth Pro 2022) donde se observa la presión ejercida por la expansión urbana que rodea a la colonia Bicentenario (en el centro). Se señalan algunas colonias de referencia.

Por otra parte, Arreygue-Rocha *et al.* (2004) evalúan el impacto hidráulico generado por los puentes construidos en el río Chiquito y destacan una condición de singular riesgo en la sección del puente Camelinas, ubicado en una zona de gran afluencia, el cual tiende a actuar

como un cuello de botella al recibir una avenida superior a $54 \text{ m}^3/\text{s}$, y también se menciona el caso de otros puentes con columnas rectangulares que crean un obstáculo al paso del flujo (p. ej. Ventura Puente y Virrey de Mendoza).

4.5 Las fallas geológicas de Morelia

Tras el sismo que afectó severamente a la ciudad de México en 1985, el fallamiento activo en la porción central del país se volvió un tema de estudio imprescindible. Con este objetivo Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego (1990) presentaron los resultados de un estudio preliminar que describe los sistemas de fallamiento regionales que caracterizan a la porción central de la Faja Volcánica Transmexicana, señalando que durante las últimas épocas geológicas esta parte del país ha estado sometida a un régimen tectónico distensivo que ha modelado un relieve de fosas y pilares, y para la porción en donde se ubica la Región de Morelia identifican la predominancia de un sistema con orientación NE-SO (sistema de fallas Cuitzeo).

De manera local, desde la década de los 80's, el fallamiento activo ha sido tema de interés en la región y se ha reconocido que, por su orientación y desplazamiento estas fallas responden a sistemas tectónicos regionales (Garduño-Monroy *et al.*, 2001) (Figura 15). Entre 1983 y 1987 la ciudad de Morelia y las poblaciones de Tarímbaro y Santa Ana Maya comenzaron a ser afectadas por una serie de fracturas que alarmaron a la población (Garduño-Monroy *et al.*, 1998). Para la ciudad de Morelia, varias colonias fueron afectadas por este fenómeno y se reconocieron 5 fallas, todas con desplazamiento normal y con dirección de E-O a NE-SO. Se trata de las fallas La Paloma, Torremolino, Chapultepec, Central Camionera y La Colina, que influyeron en la deformación estructural de casas, un hospital público, una gasolinera, una escuela pública, etc., y en algunos casos fue necesaria la demolición de las edificaciones (Garduño-Monroy *et al.*, 1998). El número de fallas identificadas en Morelia ha ido aumentando paulatinamente. En un estudio de actualización cartográfica de las fallas geológicas de Morelia y tasas de subsidencia asociadas para el ayuntamiento de Morelia, Hernández-Madrigal *et al.* (2011) reportan un total de segmentos de 13 fallas.

Garduño-Monroy *et al.* (2001) dividen las fallas de Morelia en dos grupos: fallas geológicas que han sido reactivadas por actividad antrópica y fallas tectónicas potencialmente sísmicas. Al primer grupo se le asocian las fallas con dirección NE-SO que se desplazan por procesos

de subsidencia-creep falla (PSCF) afectando solamente a los suelos y las secuencias fluvio-lacustres del Mioceno-Plioceno que forman el relleno de la cuenca donde se asienta la ciudad (Garduño-Monroy *et al.*, 2001; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006; Ávila-Olivera, 2008). Se estima que la tasa de subsidencia para estas fallas es de 4 a 6 cm anuales (Garduño-Monroy *et al.*, 2001). Las causas sugeridas para los PSCF en la ciudad de Morelia se relacionan con la presencia de secuencias lacustres y fluvio-lacustres, la sobreexplotación de acuíferos y las condiciones climáticas que acentúan estos procesos como sucedió durante los eventos del Niño de 1983-1984 y 1997-1998 (Garduño-Monroy *et al.*, 1999b; Garduño-Monroy *et al.* 2001).

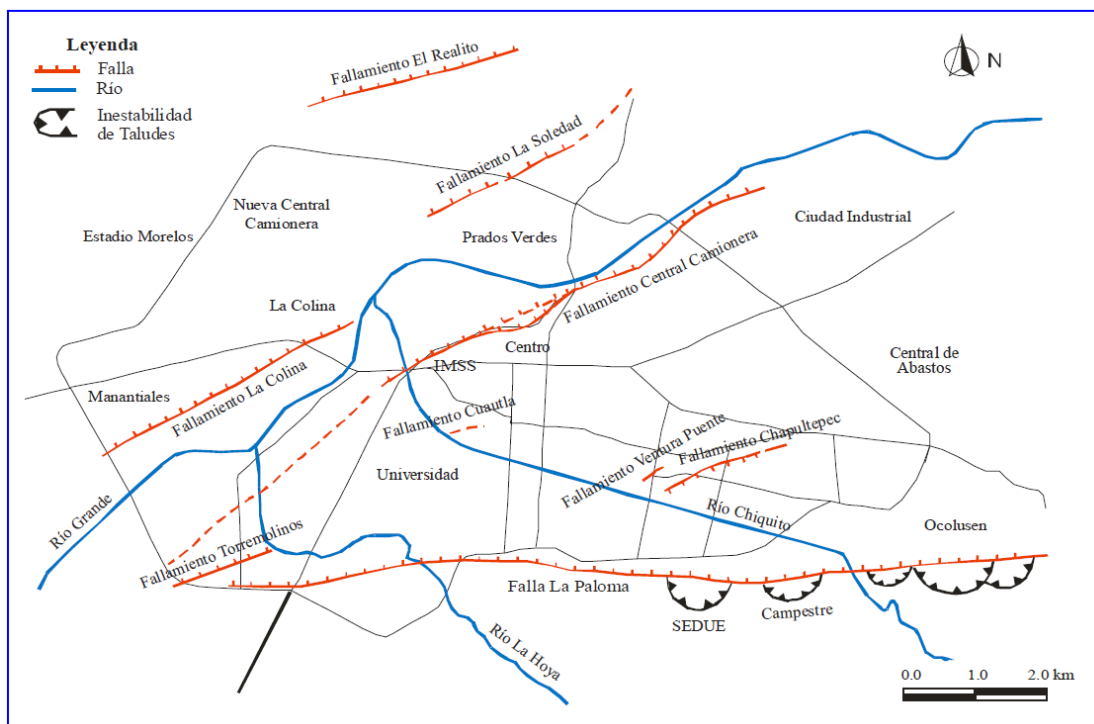


Figura 15. Plano con las principales fallas geológicas de la ciudad de Morelia (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006)

V. LAS ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS DE LA REGIÓN DE MORELIA

En este breve capítulo se hace una revisión de la localización y decretos de las Áreas Naturales Protegidas de la Región de Morelia, sus planes de manejo y los programas de desarrollo urbano y su influencia en las ANP's.

5.1 Localización y decreto de las Áreas Naturales Protegidas de la Región de Morelia

En 1936, durante el periodo cardenista, se decretan las primeras Áreas Naturales Protegidas en el estado de Michoacán, el Parque Nacional Cerro de Garnica en la región de Mil Cumbres y las entonces decretadas zonas protectoras forestales de las cuencas hidrológicas del Lago de Pátzcuaro y el Río Chiquito de Morelia y la región de Tacámbaro (Villaseñor, 2006).

Debido a las problemáticas ambientales enfrentadas por los ejidatarios de Jesús del Monte y San Miguel del Monte, al sureste de la región, causadas por la deforestación y producción de carbono, mermando en la calidad del agua y el funcionamiento del sistema hidrológico de la cuenca del río Chiquito, en 1936 es decretada la *zona protectora forestal vedada la cuenca hidrográfica del Río Chiquito* (Sánchez-Sepúlveda y Urquijo-Torres, 2012). Esta área corresponde con la zona protegida más antigua de la Región de Morelia, ahora ubicada en una zona inmediata a la zona urbana de la ciudad de Morelia, en donde las pequeñas localidades rurales, como Jesús del Monte, son absorbidas por la expansión de la traza urbana.

De acuerdo con información proporcionada por la Secretaría de Medio Ambiente del estado de Michoacán, respaldada por los decretos de Áreas Naturales Protegidas publicados en el periódico oficial del gobierno estatal, actualmente en la Región de Morelia se cuenta con 14 zonas decretadas como Áreas Naturales Protegidas de jurisdicción estatal y federal (Figura 16; Tabla 1).

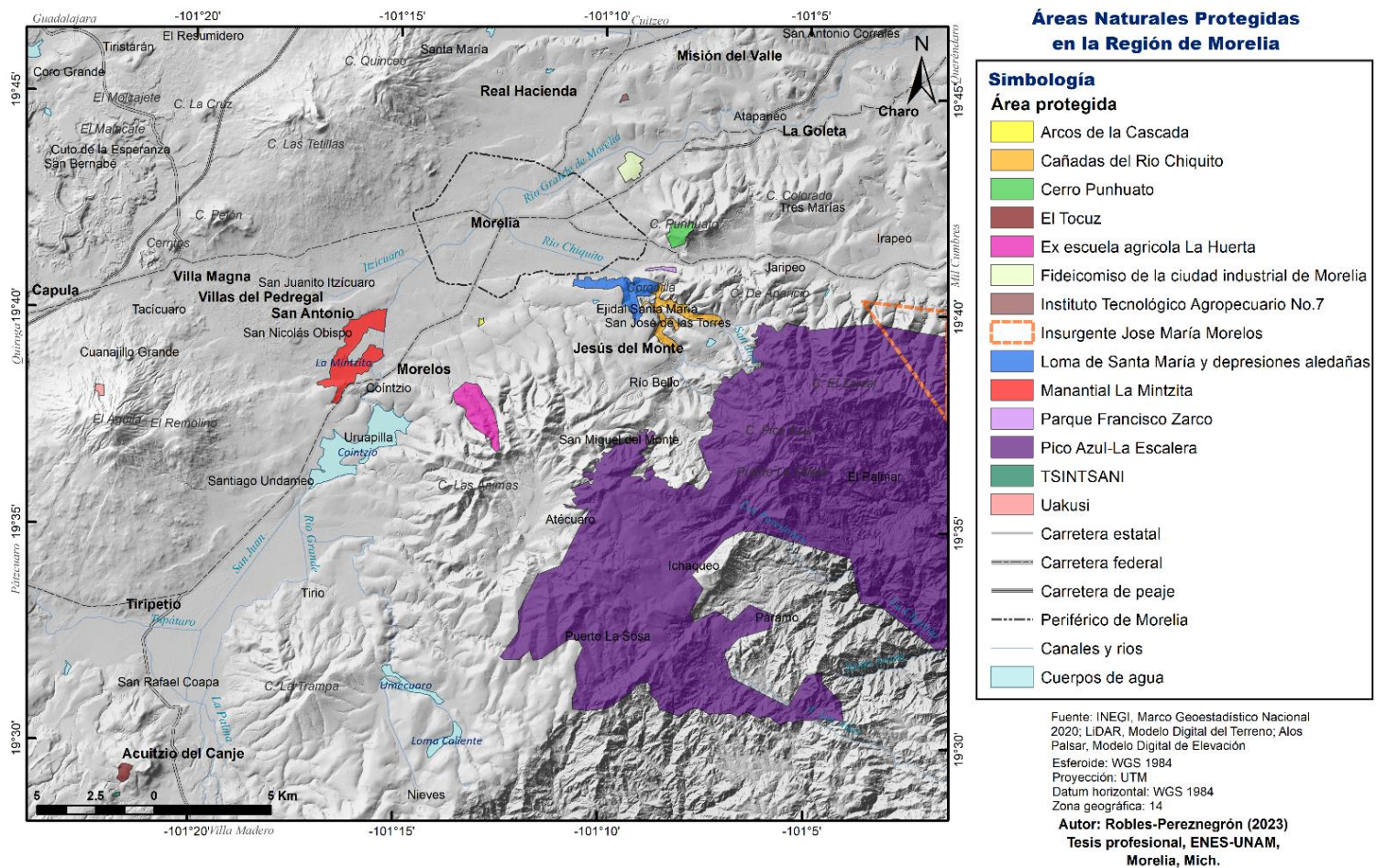


Figura 16. Mapa de la zona sureste y este de la Región de Morelia, en donde se distribuyen todas las Áreas Naturales Protegidas de la región de estudio. Algunas áreas protegidas son muy pequeñas a escala regional, p. ej. al suroeste de Acuitzio del Canje se encuentra TSINTSANI con color verde, al sur de Morelia se encuentra Arcos de la Cascada con color amarillo, al este de Real Hacienda se encuentra el área Instituto Tecnológico Agropecuario No. 7 y en la ladera norte del C. El Águila se encuentra Uakusi, todas estas con categoría de Área Destinada Voluntariamente a la Conservación. Todas las áreas protegidas son estatales a excepción del área denominada Insurgente Jose María Morelia delimitada con línea punteada color naranja.

5.2 Planes de manejo de las Áreas Naturales Protegidas de la Región de Morelia

Con respecto a los programas de manejo, dejando de lado a las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC), las cuales son manejadas por sus legítimos propietarios, solo 4 áreas cuentan con programas de manejo publicados en el Diario Oficial de la Federación, estas son: Ex escuela agrícola denominada La Huerta (2015), Manantial La Mintzita (2016), Cañadas del Río Chiquito (2020) y Fideicomiso de la ciudad industrial de Morelia (2020). Por otro lado, en 2008 se presentó un programa de manejo para el Cerro Punhuato por parte de la Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente y en 2010 se presentó un programa de restauración para el área protegida Loma de Santa María y depresiones Aledañas, por parte de la misma secretaría. En el caso del área protegida estatal Pico Azul-La Escalera y el área federal Insurgente José María Morelos, las de mayor superficie, no se cuenta con programas de manejo. Cabe destacar que estas dos últimas áreas protegidas cuentan con un traslape en su superficie.

5.3 Planes de desarrollo y cambios de las Áreas Naturales Protegidas de la Región de Morelia

Los planes de desarrollo urbano de la región se han enfocado al desarrollo de la zona urbana de la ciudad de Morelia. Se tiene registro de la publicación de instrumentos de planeación urbana de este tipo desde 1983, con el Programa de Desarrollo Urbano de Centro de Población de Morelia, el cual fue modificado en diferentes periodos, así como instrumentos de planeación centrados en zonas particulares de Morelia, como la zona norte, oriente y poniente, y otros enfocados solamente al centro histórico (IMPLAN, 2020). Se puede decir que uno de los principales objetivos de estos programas es brindar políticas para encauzar y regular el crecimiento de la mancha urbana de manera ordenada y sustentable. Sin embargo, estos programas han tenido un bajo nivel de cumplimiento, y resulta evidente que, en los diferentes momentos de las modificaciones a los programas locales de desarrollo urbano, el instrumento ha sido orientado a la consolidación de las estrategias formales e informales del mercado inmobiliario, no así a la atención de las problemáticas identificadas (IMPLAN, 2020).

Tabla 1. Se presentan las 14 Áreas Naturales Protegidas de la región, su categoría, fecha de decreto, municipio en donde se localizan y su superficie. En la fecha de decreto se coloca la fecha de la última categoría decretada en el área, ya que algunas han cambiado su categoría, pero han sido decretadas anteriormente, p. ej. Cerro Punhuato, Loma de Santa María y depresiones aledañas y Cañadas del Río Chiquito. En el caso de las Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC) se indica la duración del decreto entre paréntesis.

NOMBRE	CATEGORÍA	FECHA DE DECRETO	MUNICIPIO	ÁREA (Km ²)
Arcos de la Cascada	Área Voluntaria para la Conservación	7/enero/2015 (50 años)	Morelia	0.052
Cañadas del Río Chiquito	Zona de restauración y protección ambiental	29/abril/2011	Morelia	2.05
Cerro Punhuato	Parque urbano ecológico	26/enero/2005	Morelia	0.79
El Tocuz	Área Voluntaria para la Conservación	8/octubre/2018 (15 años)	Acuitzio	0.35
Ex escuela agrícola denominada La Huerta	Zona sujeta a preservación ecológica	31/enero/2005	Morelia	2.71
Fideicomiso de la ciudad industrial de Morelia	Parque Urbano ecológico	10/julio/1995	Morelia	0.89
Instituto Tecnológico Agropecuario No. 7	Parque Urbano ecológico	4/junio/1998	Tarímbaro	0.074
Insurgente José María Morelos	Parque Nacional	22/febrero/1939	Charo y Tzitzio	71.92
Loma de Santa María y depresiones aledañas	Zona de restauración y protección ambiental	31/diciembre/2009	Morelia	2.33
Manantial La Mintzita	Zona sujeta a preservación ecológica	31/enero/2005	Morelia	4.20
Parque Francisco Zarco	Parque urbano ecológico	15/febrero/2008	Morelia	0.17
Pico Azul-La Escalera	Zona de protección ambiental	13/septiembre/2011	Charo, Morelia y Madero	178.67
Tsintsani	Área Voluntaria para la Conservación	11/marzo/2013 (20 años)	Acuitzio	0.05
Uakusi	Área Voluntaria para la Conservación	10/junio/2021 (15 años)	Morelia	0.15

De acuerdo con Hernández y Vieyra (2010), la fuerte dinámica demográfica y la presión que esta ha generado en la ocupación de nuevos espacios en la periferia de la ciudad reflejan las debilidades de los planes de desarrollo urbano que no han sido capaces de frenar la expansión de los límites de la ciudad y estiman que esta situación continuará durante los próximos 20 años.

Ante este panorama, es de esperar que los programas de desarrollo urbano tengan una mínima influencia en la protección y rehabilitación de las zonas de relevancia ambiental de la región. Por otro lado, la figura legal de las Áreas Naturales Protegidas brinda una mayor seguridad a estas áreas, ante la ineludible expansión urbana. No obstante, también son vulnerables a la transgresión y especulación inmobiliaria, como ha sucedido anteriormente en función de intereses políticos y económicos particulares (Ávila-García, 2012).

La zona sureste de Morelia ha sido continuamente zona de conflicto ambiental, como lo evidencia la ubicación de la primera ANP de la región y una de las primeras en el país (*zona protectora forestal vedada la cuenca hidrográfica del Río Chiquito*). Es de destacar el caso del área protegida *Lomas de Santa María y depresiones aledañas*, localizada también al sureste de Morelia y decretada en 1993. En este sitio, en el año 2006 se anunció la construcción de un proyecto denominado Megapunte y Megatúnel, violando decretos de protección de la zona y beneficiando a un sector de la población muy reducido con amplios recursos (Sánchez-Sepúlveda y Urquijo-Torres, 2012). A pesar de la oposición social y en términos ambientales y de riesgo geológico, este proyecto fue realizado, incluso con una mayor dimensión a la prevista originalmente. Con una modificación a la superficie y categorización del decreto del área protegida en cuestión, que fue realizada de manera sombría el 31 de diciembre del 2009, el entonces gobernador Leonel Godoy facilitó el proceder legal a los empresarios y políticos involucrados en el proyecto, sin abrir una consulta ciudadana y sin un previo anuncio de la iniciativa (Ávila-García, 2012).

VI. MARCO TEÓRICO: GEOCONSERVACIÓN

En este capítulo se revisa, a través de cuatro breves apartados, el surgimiento del concepto y la estrategia de geoconservación. Los conceptos más importantes y las estrategias de desarrollo local sustentable que se proponen, se han desarrollado en relación con proyectos de geoturismo y en particular con la estrategia y redes europeas y mundiales de los geoparques.

6.1 La Geodiversidad y el enfoque biocéntrico de la conservación

Mucho se ha hablado de biodiversidad en cuanto a conservación se refiere, tras la Cumbre de la Tierra llevada a cabo en Río de Janeiro en 1992 el término biodiversidad adquirió gran publicidad y las estrategias de desarrollo sustentable fueron promovidas en todo el mundo. En México, en el mismo año fue creada la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) con el objetivo de coordinar las acciones y estudios relacionados con el conocimiento y la preservación de las especies biológicas (Simonian, 1999). Poco después de haber sido acordada la Convención sobre la Diversidad Biológica en la Cumbre de la Tierra de Río, en 1992 emergió el término Geodiversidad (Gray, 2018). De acuerdo con Gray (2005), el término apareció primero en publicaciones de Tasmania (Sharples 1993; Dixon 1995; Kiernan 1996) y fue posteriormente adoptado en varios países, se anticipó que dado el éxito relativo que tuvo el término biodiversidad, el término geodiversidad atraería entusiasmo hacia los sistemas geológicos.

Desde la década de los 90s, aunque de manera lenta y dispar, se ha incrementado el interés por la conservación de la diversidad de los recursos abióticos (geodiversidad). Gray (2005) discute acerca de las estrategias de conservación y el enfoque biocéntrico que estas tienen y considera que es imposible tener estrategias de manejo sensibles cuando se ignoran los aspectos físicos del ambiente como son la topografía, los suelos y los procesos físicos. La biodiversidad de la Tierra es en gran parte debida a la diversidad del mundo geológico (geodiversidad), y para que un manejo del territorio sea efectivo es necesario tener un entendimiento y acercamiento holístico (Gray, 2005). La geodiversidad es definida por el

mismo autor como “la diversidad de las características geológicas, geomorfológicas y edafológicas; incluye su ensamble, estructuras, sistemas y contribuciones al paisaje” (Gray, 2013). El utilizar los términos geodiversidad y biodiversidad ayuda a indicar que la naturaleza está conformada por dos componentes iguales, uno vivo y otro no vivo (biótico y abiótico), lo cual puede promover una aproximación holística a la conservación de la naturaleza (Gray, 2005).

Pero ¿cómo se puede visualizar esa diversidad que hasta hace poco ha sido soslayada o en el mejor de los casos tomada en cuenta de una manera implícita en la bioconservación? Para Gray (2005) la geodiversidad puede ser ilustrada por los más de 5000 minerales reconocidos en el mundo, los cuales en combinación con diversos factores de formación generan características diversas como el tamaño de cristales o partículas, la forma y sus estructuras, lo cual crea cientos de diferentes tipos de rocas. También menciona los millones de fósiles catalogados, así como las formas del relieve cuya clasificación se vuelve aún más compleja, y qué decir de los procesos geológicos causantes de tal diversidad que al ser examinados a fondo se vuelven cada vez más complejos y diversos.

6.2 La Geoconservación y la valoración de la Geodiversidad

Es así como surge una disciplina emergente de las geociencias, la geoconservación. La geoconservación tiene como objetivo preservar la diversidad natural de las características geológicas, geomorfológicas, de suelos y sus procesos, y de mantener las magnitudes y tasas de cambio en esas características y procesos (Sharples, 2002). Al igual que Gray (2005), Sharples reconoce que el componente abiótico es tan importante como el biótico en el medio ambiente, es de hecho una base esencial para la bioconservación ya que su degradación impacta directamente sobre la comunidad biótica, pero también sostiene que, la geoconservación no se enfoca solo en la importancia del medio abiótico para la conservación de los sistemas biológicos, sino que tiene un valor propio e independiente de los roles que funge para sostener a la biodiversidad.

La primera reunión internacional sobre geoconservación fue realizada en Holanda en 1988 con la presencia de siete países europeos, en la cual uno de los objetivos del encuentro fue el establecimiento de un grupo de trabajo europeo abocado al desarrollo de la geoconservación, lo cual evolucionó en 1993 a la creación de la asociación ProGeo (ProGeo, 2021). Posterior

a la Conferencia Internacional para la Protección del Patrimonio Geológico llevada a cabo en 1991 en Digne-les-Bains, Francia, hubo un creciente interés científico hacia los temas asociados al geopatrimonio (geoconservación, geoturismo, geoparques; Reynard y Brilha, 2018). Es en este último evento que surge por primera vez el término *patrimonio geológico*, que se traduce de *geological heritage* y evolucionó posteriormente a la palabra geopatrimonio (Brocx y Semeniuk, 2007). Esta última se traduce al inglés como *geoheritage*, mismo nombre que lleva la revista científica creada en el año 2009 por la asociación ProGeo (Reynard y Brihla, 2018), *Geoheritage*, la cual se encarga de temas relacionados al geopatrimonio y su conservación. Entre otros eventos relevantes para el desarrollo de la geoconservación destacan la creación de un grupo de especialistas en geopatrimonio dentro de la Comisión Mundial de Áreas Protegidas por parte de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) (Woo, 2017) y en 2016 la Unión Internacional de Ciencias Geológicas crea la Comisión Internacional de Geopatrimonio (Reynard y Brihla, 2018).

Durante las últimas tres décadas, han surgido nuevos conceptos relacionados a la geoconservación, y se han destacado diversas formas de valorar a la geología. Para Brilha (2016) el objetivo de la geoconservación es identificar, proteger y manejar elementos valiosos de la geodiversidad, y considera que existen dos grandes tipos de geodiversidad hacia los cuales se encaminan las estrategias de geoconservación: i) el geopatrimonio y ii) los geositos con diversos valores (e.g. educativo, cultural, estético (paisaje), etc.). Sin duda destaca el concepto de geopatrimonio, el cual se identifica como un término general aplicado a aquellos elementos de la geodiversidad con un excepcional valor científico. Por ejemplo, el Reino Unido es señalado por diversos autores como la cuna de la geología moderna, ahí se desarrollaron los fundamentos de la estratigrafía y la paleontología gracias a aportaciones de James Hutton (1726-1797), William Smith (1769-1839) y Charles Lyell (1797-1875) entre otros. Estos principios fueron pensados y observados en lugares específicos como el sitio de la discordancia de Hutton en Escocia y debido a su importancia científica son parte del geopatrimonio mundial.

El valor científico de los elementos de la geodiversidad está directamente relacionado con su importancia para el conocimiento del funcionamiento pasado y presente de la geosfera, así como de otros sistemas con los que interactúa (Brilha, 2016). El Reino Unido es a su vez

considerada la cuna del geopatrimonio y la geoconservación basada en el inventario sistemático (Anon, 1990a, en Brocx y Semeniuk, 2007); esta última se trata de una metodología que busca identificar el geopatrimonio en sitios específicos para así crear inventarios orientados a la geoconservación, y se detalla más adelante.

Además de su valor científico, estos sitios pueden tener un valor educativo, cultural y estético y son denominados geositos (Brilha, 2016). Otro caso es cuando un elemento es extraído de su posición natural original, para ser expuesto exhibido y adquiere un nuevo valor identitario, naturalmente atribuido en el tiempo por la gente; como es el caso de minerales o piezas paleontológicas excepcionales que son expuestos en museos. Estos también son considerados geopatrimonio, solo que *ex situ* (Figura 17; Brilha, 2016).

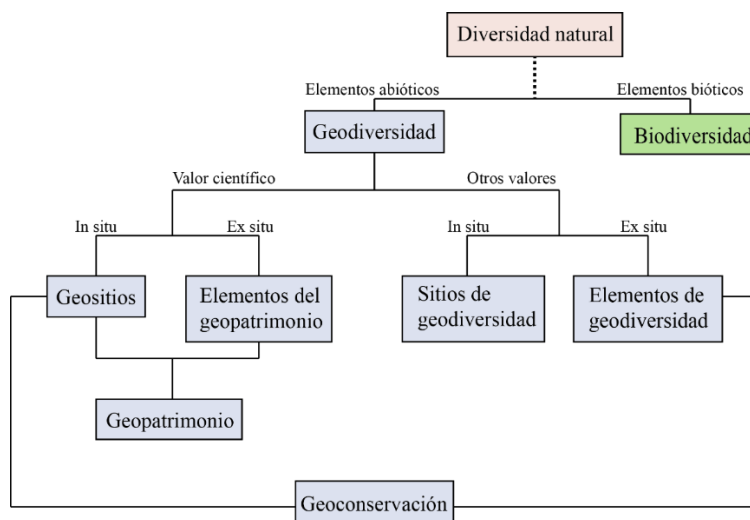


Figura 17. Principales conceptos de geoconservación y sus relaciones (modificado de Brilha, 2016).

Por su parte, Gray (2005) señala 6 formas de valorar la geodiversidad: 1) valor intrínseco, 2) valor cultural, 3) valor estético, 4) valor económico, 5) valor funcional y 6) valor educativo. A lo que añade que, existen dos razones para conservar la geodiversidad, la primera es su diversidad de valores y la segunda son las crecientes amenazas que recibe de las actividades humanas.

Con el valor intrínseco se refiere al valor que tiene la geodiversidad por el solo hecho de existir, sin importar el uso al que se somete; el valor cultural es aquel asociado a las creencias que las personas crean en torno a elementos geológicos y se vuelven parte de su identidad cultural, así como de aspectos arqueológicos asociados a elementos geológicos. No hace falta

definir al valor estético, aunque es un valor subjetivo en ocasiones este es indudable. Gray cita a John Muir con una de sus frases, quien fue fascinado por el paisaje de la Sierra Nevada, naturalista curioso por la geología y defensor del Parque Nacional Yosemite: *“climb the mountains and get the good tidings. Nature’s peace will flow into you as sunshine flows into trees”*. Así, esta última frase hace referencia a dos valores que inspiraron a Muir y son señalados por Gray; el valor estético y el sentido de pertenencia, que forma parte del valor cultural. El valor económico lo asocia a los ingresos generados a partir de la explotación de los recursos geológicos; el valor funcional incluye los servicios que el sistema geológico provee, por ejemplo, la filtración de agua en su camino a los acuíferos y el almacenamiento de agua, gas y petróleo. El valor funcional de los sistemas geológicos puede equipararse con lo establecido por los conservacionistas como servicios ecosistémicos, que tienen un enfoque biocéntrico, en este caso son llamados servicios geosistémicos. Por último, el valor educativo es debido a las oportunidades de investigación científica y educación dirigidas a todos los niveles educativos, en torno a la educación de las geociencias.

6.3 Inventarios de Geodiversidad para la Geoconservación

No se pueden conservar todos los elementos de la geodiversidad y realizar la selección de aquellos sitios que son aptos para manejarse a través de estrategias de conservación tampoco debe ser una tarea azarosa. Se han desarrollado métodos que pretenden disminuir la subjetividad de dicha selección para que esa conservación cumpla con sus objetivos, ya sean educativos, turísticos, científicos, entre otros. Mediante métodos cualitativos, cuantitativos y una mezcla de ambos se han propuesto formas de evaluar la geodiversidad, Zwolinski et al. (2018) hace una revisión de los diferentes métodos desarrollados.

La identificación de la geodiversidad es el primer paso de cualquier estrategia de geoconservación y para ello se han adoptado los inventarios, que consisten, de manera general, en una lista que incluye las características y ubicación de los sitios que deben ser conservados. Brilha (2016) menciona que, durante las últimas décadas, países europeos como Polonia, Portugal, España, Suiza, Rusia y el Reino Unido han desarrollado inventarios nacionales de geosítios.

José Brilha (2005), quien fue presidente de la asociación ProGeo, con base en su experiencia e investigación en torno al manejo del patrimonio geológico, propone que las estrategias de

geoconservación deben seguir cinco pasos sucesivos: 1) inventario, 2) evaluación cuantitativa, 3) conservación, 4) interpretación y promoción y 5) monitoreo. Brilha (2016) se centra en la metodología para la realización del inventario y la evaluación cuantitativa. De manera general esta metodología se divide en dos tipos, una para los geositos, es decir aquellos sitios con valor científico excepcional, y otra para los sitios de geodiversidad, cuyos dos grandes valores son el potencial uso turístico (geoturismo) y el potencial uso educativo. Para ambos tipos, se parte de una revisión de la información geológica existente de la zona para hacer una selección de geositos y sitios de geodiversidad potenciales, basados en el valor científico del sitio, actividades educativas realizadas en la zona y actividades turísticas, respectivamente. Posteriormente se obtiene una lista de sitios potenciales que son verificados en campo y son evaluados cuantitativamente mediante análisis multicriterio, que consiste en la ponderación y suma de una serie de criterios para seleccionar de una manera más objetiva cuáles serán los sitios incluidos en la lista final de geositos y sitios de geodiversidad (Figuras 18 y 19).

GEOSITOS	
Inventario de áreas limitadas	Inventario de áreas extensas
Revisión de literatura geológica Consultas con expertos del área de estudio	
	Definición de marcos geológicos y asignación de coordinadores científicos Caracterización científica de cada marco geológico Identificación de geositos representativos de cada marco geológico
Lista de geositos potenciales	Lista de geositos potenciales por marco geológico
Trabajo de campo para la identificación de nuevos geositos y para la evaluación cualitativa de cada geosito en la lista de geositos potenciales, basado en los siguientes cuatro criterios: - Representatividad - Integridad - Rareza - Conocimiento científico	
Lista final de geositos con caracterización completa	Lista final de geositos, por marco geológico, con caracterización completa
Evaluación cuantitativa de valor científico	
Evaluación cuantitativa del riesgo a degradación	
Lista final de geositos, ordenada por resultados de valor científico y riesgo a degradación	Lista final de geositos, por marcos geológicos, ordenada por resultados de valor científico y riesgo a degradación
Eventual evaluación cuantitativa de potenciales usos educativos y turísticos	

Figura 18. Metodología para la creación de inventarios de geositos (modificado de Brilha, 2016).

Para los geositos, los criterios que propone Brilha (2016) son; representatividad, integridad, rareza y conocimiento geológico. Para los sitios de geodiversidad con potencial educativo propone potencial educativo, diversidad geológica, accesibilidad y seguridad; mientras que para los de potencial turístico propone escenario, potencial interpretativo, accesibilidad y seguridad. Posterior a la evaluación cuantitativa se obtiene una lista final a la que se añade una evaluación de riesgo de degradación de los sitios, también cuantitativa y basada en una serie de criterios, para así poder tener un mejor manejo de los sitios al comprender el riesgo al que se exponen al asumir un uso específico.

SITIOS DE GEODIVERSIDAD	
Valor educativo	Valor turístico
Revisión de literatura geológica Consulta con expertos en el área de estudio	
Revisión de sitios usados en actividades educativas	Revisión de material de publicidad turística
Lista de potenciales sitios de geodiversidad	
Trabajo de campo enfocado a la identificación de nuevos sitios y a la evaluación cualitativa de cada sitio de la lista de potenciales sitios de geodiversidad, basado en los siguientes criterios:	
<ul style="list-style-type: none"> - potencial didáctico - diversidad geológica - accesibilidad - seguridad 	<ul style="list-style-type: none"> - escenario - potencial interpretativo - accesibilidad - seguridad
Lista final de sitios de geodiversidad, con caracterización completa	
Evaluación cuantitativa de uso potencial educativo	Evaluación cuantitativa de uso potencial turístico
Evaluación cuantitativa de riesgo a degradación	
Lista final de sitios de geodiversidad ordenada por uso potencial educativo y riesgo a degradación	Lista final de sitios de geodiversidad ordenada por uso potencial turístico y riesgo a degradación

Figura 19. Metodología para la creación de inventarios de sitios de geodiversidad (modificado de Brilha, 2016).

6.4 Geoturismo y Geoparques

A principios de este siglo surgen los primeros convenios y actividades que promocionaron una nueva forma de desarrollo territorial que valora de manera central a la geodiversidad. Motivados por el sesgo biológico de los programas mundiales de conservación, una comunidad europea de geocientíficos desarrolló el concepto de geoparque. El concepto original de geoparques fue desarrollado en Europa a finales de los 80's y en menos de veinte años ganó reconocimiento mundial, llevando al geopatrimonio fuera del pequeño mundo de

los geocientíficos (Brilha, 2018). En la Figura 20 se señalan los eventos más relevantes que permitieron la evolución de esta estrategia; programas como El Hombre y la Biosfera en 1972 y la Convención sobre el Patrimonio Mundial en 1973, con un enfoque predominantemente biocéntrico motivó a la comunidad geocientífica a tomar medidas para que la geodiversidad fuera también valorada; posteriormente se llevaron a cabo eventos pioneros que establecieron las bases del movimiento geoconservacionista como el simposio en Digne, Francia en 1991, la creación del primer geoparque en 1989, *Gerolstein District Geopark* actualmente llamado *Vulkaneifel Geopark*, y la creación de la asociación ProGeo en 1993; y a principios del siglo se crea la Red Europea de Geoparques seguida por otras redes mundiales y regionales. La idea de que el desarrollo territorial sustentable podría emerger de la protección del patrimonio geológico fue reconocida por la UNESCO en 2015 con la creación del Programa Internacional de Geociencias y Geoparques (Reynard y Brihla, 2018). Actualmente, este último cuenta con 169 Geoparques Globales distribuidos en 44 países, concentrados en Europa y China, con casos más aislados en Sudamérica, América Central y Canadá (UNESCO, 2021a). En la página oficial de la Red Global de Geoparques de la UNESCO puede ser consultado el mapa y la lista completa de geoparques (UNESCO, 2021b). Recientemente México se unió al programa y cuenta con dos Geoparques Globales; el Geoparque Comarca Minera en el estado de Hidalgo y el Geoparque Mixteca Alta en el estado de Oaxaca, ambos designados en el año 2017.

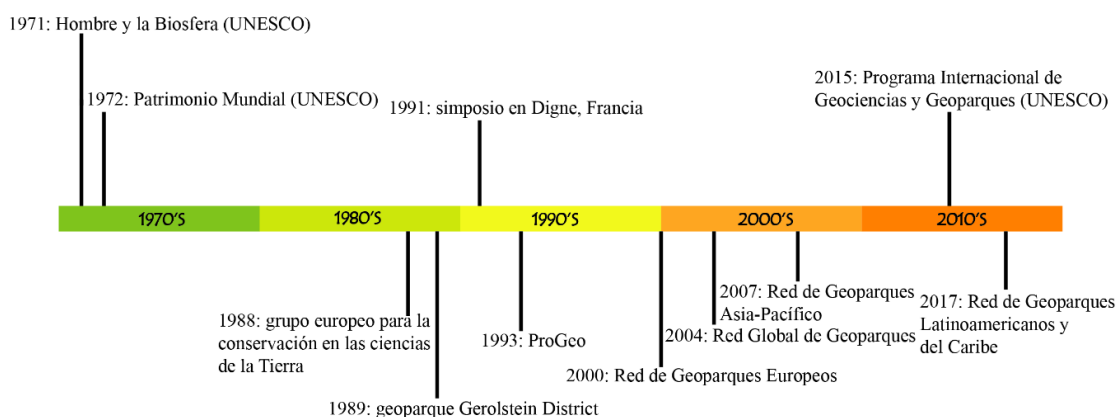


Figura 20. Línea del tiempo que marca algunos de los eventos más relevantes para la promoción y creación de geoparques en todo el mundo (modificado de Brilha, 2018).

Como se mencionó antes, el geoturismo es una de las diversas formas de valorar la geodiversidad y es una de las estrategias centrales de los geoparques. Naturalmente no se

refiere a un típico turismo de masa, como no es nada reciente el turismo en sitios donde las características geológicas y geomorfológicas son el atractivo central, que aunado a otras formas de patrimonio natural y cultural atraen a visitantes que generan beneficios a las comunidades de estos territorios. Así, ha surgido una denominación específica para este tipo de actividad, el geoturismo, que definido por Newson y Dowling (2018): es un turismo que se enfoca en el paisaje y la geología de un área como elementos base para impulsar el desarrollo sustentable, con beneficios para la conservación, las comunidades y la economía. En otras palabras, es un turismo que nace de la identificación de la geodiversidad para dar una amplia cabida a la valoración de otras formas de patrimonio que la complementan creando un entendimiento holístico del territorio, orientado al desarrollo sostenible. Dowling (2010) define al geoturismo de la siguiente manera:

El geoturismo es una forma de turismo en áreas naturales que se enfoca específicamente en la geología y el paisaje. Promueve el turismo a los geositos, la conservación de la geodiversidad y el entendimiento de las ciencias de la Tierra a través de la apreciación y el aprendizaje. Esto es logrado mediante visitas independientes a elementos geológicos, uso de geo-senderos y miradores, tours guiados y geo-actividades. (p.1)

El geoturismo hace énfasis sobretodo en informar y generar una cierta consciencia del territorio entre los turistas y a las comunidades locales acerca de la Tierra a través de interpretación geológica y educación, y el carácter del geoturismo es tal que puede llevarse a cabo en un rango de ambientes, desde naturales a construidos, a diferencia del ecoturismo que ocurre y depende de ambientes naturales (Dowling, 2010). En este último estudio se relaciona al geoturismo con otras formas de turismo: el turismo cultural, el turismo de aventura y el ecoturismo. El turismo cultural se relaciona con el geoturismo por el uso histórico que le da la sociedad a los materiales geológicos y el significado propio que estas le atribuyen a las rocas y el paisaje; el turismo de aventura se relaciona al geoturismo por la geología y el paisaje de fondo que poseen actividades como el montañismo y la escalada, entre otras actividades de deportes extremos; por último, el ecoturismo se asocia por el control geológico que tiene la distribución de la flora y la fauna, además del carácter educativo de ambos tipos de turismo y las actividades deportivas afines como el senderismo (Figura 21).

Dowling (2010) destaca que el geoturismo puede realizarse en un amplio rango de escalas, puede ser incluso un señalamiento en un corte carretero. Menciona un interesante material utilizado en los Estados Unidos para guiar a los turistas a través de rutas geoturísticas, se trata de una serie de libros de nombre *Roadside Geology*, escrita por geólogos que describen de manera entendible para un público general las características de la geología regional, el relieve y las rocas y minerales que se presentan, además son ilustrados con mapas, diagramas y fotos (Figura 22).

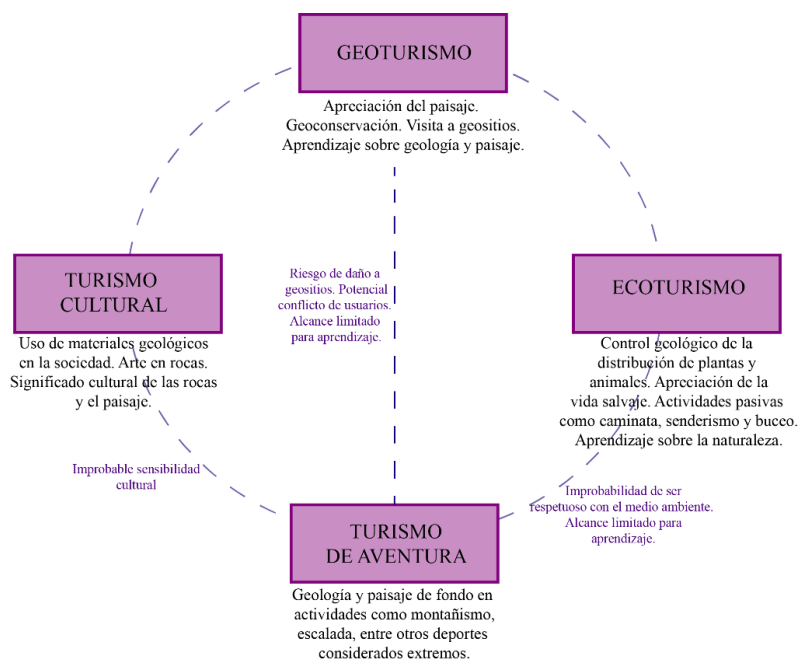


Figura 21. Relaciones que tiene el geoturismo con otras formas de turismo. En letras color morado se indican algunas características interconectadas entre las formas de turismo (modificado de Dowling, 2010).

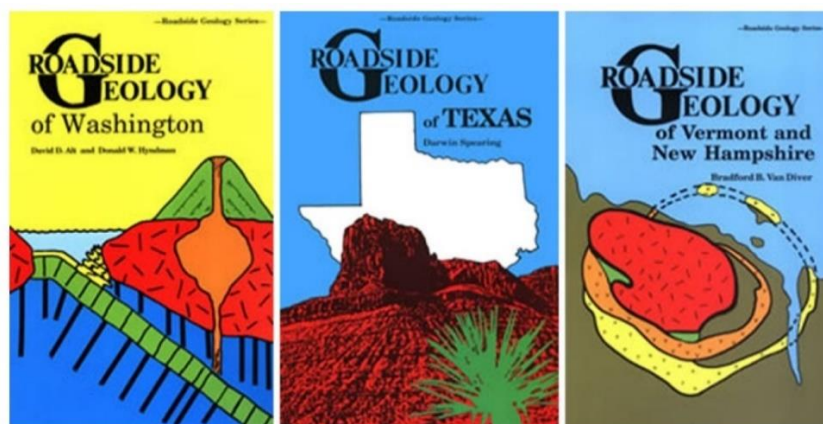


Figura 22. Portadas de guías geoturísticas de Washington, Texas y Vermont y New Hampshire, Estados Unidos (tomado de Dowling, 2010).

VII. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

7.1 Justificación

La Región de Morelia, definida como un polígono que abarca al municipio de Morelia y delimitado en parte de municipios colindantes, se ubica en la porción central de la Faja Volcánica Transmexicana, con características geológicas principalmente configuradas por volcanes, lagos y fallas. La ciudad de Morelia está ubicada en la porción central de la zona de estudio, es la ciudad más extensa y poblada de Michoacán.

Desde la década de los ochenta, en Morelia se han estudiado diversas problemáticas geológico-ambientales relacionadas con sus características naturales y el crecimiento urbano. A pesar de que se han desarrollado numerosos estudios científicos para comprender las cualidades físicas del territorio y sus implicaciones (sobre todo de riesgo geológico), hay poca atención a lo sugerido en estos trabajos. Al revisar los recientes planes de desarrollo urbano del municipio, resulta evidente el carácter superficial con el que se tratan las condiciones geológicas y geomorfológicas del territorio ante y durante el proceso de expansión urbana. Afectaciones por inundaciones (Arreygue-Rocha *et al.*, 2005; Hernández y Vieyra, 2005), daños a viviendas y edificios localizados en zonas con importante fallamiento geológico (Garduño-Monroy *et al.*, 1998; Garduño-Monroy *et al.*, 2001; Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Suter, 2016), procesos de remoción en masa (Arreygue-Rocha *et al.*, 2002; Hernández-Madrigal *et al.*, 2004; Pola-Villaseñor *et al.*, 2006), procesos de subsidencia creep-falla (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006) y contaminación de los mantos acuíferos (Israde-Alcántara *et al.*, 2005) son algunas de las problemáticas que han sido evidenciadas en la ciudad colonial de Morelia. Esto último, aunado a la expansión acelerada y desordenada del suelo de uso urbano marca la tendencia de un escenario con problemáticas geológico-ambientales en aumento (López-Granados *et al.*, 2001; Vargas-Uribe, 2014). Frente a este escenario geológico y ambiental, la presión que ejerce la expansión urbana también se extiende hacia áreas de gran valor ambiental, a pesar de que

algunas poseen decreto de Área Natural Protegida (Sánchez-Sepúlveda y Urquijo-Torres, 2014; Ávila-García, 2014).

En otro orden de ideas, la geoconservación emerge como una estrategia de desarrollo territorial que surge de la valoración y protección del patrimonio geológico y la geodiversidad. La geoconservación es el conjunto de técnicas y medidas encaminadas a asegurar la conservación (incluyendo la rehabilitación) del patrimonio geológico y de la geodiversidad, basada en el análisis de sus valores intrínsecos, su vulnerabilidad y en el riesgo de degradación (Carcavilla, 2007). A partir de la identificación y valoración del patrimonio geológico y la geodiversidad de una región se han planteado estrategias exitosas de desarrollo social y económico como son los geoparques y el geoturismo. Desde la década de los ochenta se han conformado redes de especialistas para la geoconservación, primero en Europa y ya en el siglo XXI esto ha sido extendido a otras regiones de Asia y Latinoamérica (Reynard y Brilha, 2018). Una de las propuestas más significativas para la geoconservación es la Red Global de Geoparques de la UNESCO, la cual actualmente cuenta con 177 geoparques distribuidos en 46 países (UNESCO, 2021b). En México, desde el 2017 se cuenta con dos geoparques que forman parte de esta red global, los geoparques Mixteca Alta en Oaxaca y Comarca Minera en Hidalgo. Este último, además de contener patrimonio geológico, cultural e histórico, también incluye en su operatividad a importantes Áreas Naturales Protegidas como el Parque Nacional El Chico, una de las áreas protegidas más antiguas del país, cuyos antecedentes se remontan a finales del siglo XIX (Melo, 2002; Geoparque Comarca Minera, 2022). Estos geoparques son utilizados para promover el desarrollo sostenible de las comunidades locales a través del geoturismo, además de la promoción de productos locales y programas científicos y educativos (Geoparque Mixteca Alta, 2022; Geoparque Comarca Minera, 2022). Diversos estudios han abordado la perspectiva de la geoconservación para identificar el patrimonio geológico y la geodiversidad en diferentes regiones del país, p. ej. en la Península de Baja California, en la Reserva de la Biosfera de Zapotitlán de las Salinas-El Encinal, en el Área Natural Protegida El Orito en Guanajuato, en la Costa Norte de Michoacán, Pico de Tancítaro, entre otros; sin embargo, las referencias a los geositios, geomorfositos y geoparques son aún escasas (Palacio-Prieto et al., 2016). En este sentido, en Michoacán, se han efectuado avances importantes en la valoración del Distrito Minero El Oro-Tlalpujahuá, sin embargo, no se ha concretado un

proyecto de geoconservación (Espinosa-Rodríguez, 2017; Sánchez-Cortez, 2020). No obstante, el potencial de Michoacán para la ejecución de proyectos de geoconservación ha sido explorado inicialmente. Los valores culturales, históricos, naturales y de relevancia científica internacional, unidos a zonas con alta marginación social y económica, así como la meseta purépecha, en donde el paisaje volcánico Plio-Cuaternario se encuentra con uno de los volcanes monogenéticos más jóvenes del mundo, el Parícutin, son un caso ejemplar para la consideración urgente de propuestas de geoconservación.

Uno de los fundamentos que dieron origen al movimiento de geoconservación está basado en la crítica al enfoque biocéntrico que tradicionalmente ha tenido la conservación de la naturaleza, centrada en la protección de la flora y la fauna. Este enfoque mantiene en rezago de las estrategias de manejo a los factores abióticos que proporcionan el medio y la estructura sobre la cual se desarrolla la biodiversidad. El componente abiótico es tan importante como el biótico, es de hecho una base esencial para la bioconservación ya que su degradación impacta directamente sobre la comunidad biótica (Sharples, 2002). En algunos países incluso se han creado inventarios nacionales de geodiversidad, p. ej. Polonia, Portugal, España, Suiza, Rusia y Reino Unido (Brilha, 2016). Pero, como se puede inferir, estos países protegen a la geodiversidad y el patrimonio geológico de manera explícita en sus legislaciones, lo cual les ha permitido efectuar la planeación y acciones necesarias para la geoconservación. En México, la legislación ambiental actual no contempla la protección de la geodiversidad y el patrimonio geológico, y a pesar de que ha habido iniciativas, estas han sido desechadas, no obstante, se debe considerar que la bioconservación no es sinónimo de una conservación ambiental integral (Palacio-Prieto, 2013 y 2016). En este contexto, se ha planteado que las estrategias de geoconservación pueden ser llevadas a cabo en áreas que ya cuentan con el propósito de conservación como son las Áreas Naturales Protegidas, en donde su implementación es complementaria y de ninguna manera opuesta (Palacio-Prieto, 2015).

De acuerdo con Brilha (2016), el primer paso en el desarrollo de cualquier proyecto de geoconservación inicia con el reconocimiento de su geología, a lo cual añadiría el reconocimiento de su geomorfología, tomando en cuenta la definición de geoconservación de Carcavilla (2007). Por lo tanto, en este trabajo se busca analizar la geodiversidad de la Región de Morelia como una propuesta para valorar su patrimonio geológico y geodiversidad desde una perspectiva del paisaje, la geología y la geoconservación. Lo anterior, tomando en

cuenta los avances en el conocimiento de la geología de la Región de Morelia, especialmente las contribuciones recientes que de manera marcada han aumentado desde el año 2015; las constantes problemáticas geológico-ambientales que siguen siendo soslayadas ante la ineludible expansión urbana que no contempla un proyecto de ciudad, sino los intereses particulares, tanto de los especuladores urbanos legalmente conformados, como de los fraccionadores irregulares (Vargas-Uribe, 2014) y; las 14 Áreas Naturales Protegidas de orden estatal y federal que se distribuyen en la región y que particularmente se concentran al sur y sureste de Morelia.

6.2 Objetivo general

Con base en la integración de la información geológica y geológico-ambiental de la Región de Morelia, analizar su geodiversidad y su potencial de geopatrimonio como una propuesta de geoconservación para el desarrollo sustentable y encontrar alternativas para mitigar los riesgos geológicos.

6.3 Objetivos específicos

1. Con base en la compilación y síntesis bibliográfica definir los grandes eventos geológicos de la Región de Morelia.
2. Determinar la cantidad, diversidad y distribución espacial de las geoformas volcánicas.
3. Definir los diferentes dominios de paisaje y sus relaciones con los eventos geológicos y tectónicos.
4. Integrar y discutir la cartografía morfoestructural y geológica con las Áreas Naturales Protegidas de la región bajo un enfoque de geoconservación.
5. Discutir la relevancia de la geoconservación con las problemáticas ambientales y de peligro geológico de la Región de Morelia.

VIII. METODOLOGÍA Y MATERIALES

8.1 Revisión bibliográfica

La primera etapa de este proyecto consistió en la elaboración de una base de datos bibliográficos referentes al conocimiento geológico de la región. Se identificaron las líneas de investigación más relevantes asociadas al estudio de la geología de la Región de Morelia, lo cual permitió ampliar la base mediante búsquedas más específicas. Posteriormente, la base de datos fue dividida en dos grupos temáticos, un grupo temático primario en donde se encuentran los trabajos con mayores aportes a la geología de la Región de Morelia y por lo tanto de mayor utilidad para la creación de cartografía geológica. Dentro del grupo temático secundario se organizaron las temáticas restantes (Anexo 2).

Por otro lado, se realizó una revisión y selección de material bibliográfico relacionado al concepto y funcionamiento de las Áreas Naturales Protegidas en México (Anexo 1) y de las áreas localizadas en la Región de Morelia. También se revisaron los antecedentes relacionados al surgimiento, avances y conceptos más importantes de la Geoconservación.

8.2 Materiales cartográficos

Para el análisis espacial del área de estudio se recopilaron materiales cartográficos digitales que fueron utilizados durante el trabajo de campo, la clasificación de morfologías volcánicas y la delimitación de dominios morfoestructurales y unidades geológicas. Los insumos cartográficos fueron los siguientes:

1. Cartas topográficas y datos vectoriales de INEGI

Fueron utilizadas seis cartas topográficas escala 1:50 000 de INEGI con claves: E14A12 (Coeneo de la Libertad), E14A13 (Cuitzeo del Porvenir), E14A22 (Pátzcuaro), E14A23 (Morelia), E14A32 (Villa Escalante) y E14A33 (Villa Madero). Así mismo, se descargó de INEGI el conjunto de datos vectoriales de las mismas 6 cartas que incluye curvas de nivel a intervalos de 20 m, cuerpos de agua, corrientes de agua, calles, caminos, carreteras, localidades urbanas y rurales, entre otros.

2. Modelos digitales de elevación (MDE)

Para cubrir la totalidad del área de estudio se usaron dos tipos de MDE. Cubriendo la mayor parte de la Región de Morelia, se utilizó un MDE tipo LiDAR con resolución de 5 m y para completar el área de estudio se utilizó un MDE Alos Palsar con resolución de 12.5 m. Estos modelos fueron incorporados al software ArcMap 10.5 y procesados para obtener modelos de sombras y de pendientes.

3. Imágenes satelitales

Se utilizó una imagen satelital SPOT 6 con alta resolución de 1.5 m pancromática y de 6 m multiespectral. También se consultaron las imágenes disponibles en el software Google Earth Pro versión 7.3.4 de, el cual contiene imágenes Lansat 8 con resolución media de 30 y 15 m.

4. Cuencas y redes hidrográficas del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL)

Del Simulador de Flujos de agua de Cuencas Hidrográficas de INEGI, denominado SIATL, se descargaron los archivos vectoriales de las redes hidrográficas y la delimitación de cuencas y subcuencas de las regiones hidrográficas Lerma-Santiago y Balsas, regiones que confluyen en el área de estudio. Posteriormente estos archivos fueron recortados en ArcMap 10.5 para ajustarse al área de estudio

8.3 Revisión cartográfica

Tras la revisión de la base de datos bibliográficos, se identificaron y seleccionaron los trabajos de referencia que han elaborado cartografía geológica dentro del área de estudio. Tras la revisión de estos trabajos se recopilaron y ordenaron cronológicamente todas las edades isotópicas publicadas (Anexo 4), las cuales fueron georreferenciadas y proyectadas en ArcMap 10.5.

8.4 Morfología de volcanes: clasificación

Por medio de percepción remota se identificó el mayor número de centros eruptivos de la región. Para realizar una clasificación de geoformas volcánicas se estudió el marco conceptual de Gómez-Calderón (2018), en donde se sintetizan e ilustran las geoformas volcánicas más importantes y sus definiciones recientes, que en conjunto con los insumos

cartográficos señalados anteriormente permitieron discriminar las diferentes geoformas volcánicas. También se examinaron las clasificaciones volcánicas de los trabajos seleccionados en la revisión cartográfica. De manera complementaria, en ArcMap 10.5 se proyectó un archivo vectorial de puntos con la ubicación y clasificación volcánica de los centros eruptivos reconocidos por Hasenaka y Carmichael (1985b). Finalmente, se creó un *shapefile* de puntos con la ubicación de todos los centros eruptivos identificados y su clasificación volcánica (Anexo 3).

8.5 Análisis morfoestructural (dominios y lineamientos)

Un dominio morfoestructural es una unidad de relieve que puede ser delimitada y definida por poseer características geomorfológicas relativamente uniformes dentro de un espacio continuo. Esta afinidad de características geomorfológicas es sintetizada en los dominios morfoestructurales y representan la expresión superficial de procesos morfogenéticos, los cuales están relacionados con procesos geológicos y su temporalidad. La división de la totalidad del relieve de un área de estudio en dominios nos permite realizar modelos de su génesis y evolución del paisaje, que posteriormente pueden ser relacionados con un sistema más grande que correspondería a toda la zona de estudio. Se trata de un análisis espacial preliminar a la elaboración de una cartografía geológica.

La delimitación de los dominios morfoestructurales se realiza mediante el análisis de las características geomorfológicas cualitativas y cuantitativas que son el resultado de los agentes de la morfogénesis o procesos geológicos que reciben distintos nombres; endógenos y exógenos; constructivos y destructivos; primarios y secundarios. De manera sintética, corresponden a: altitud, pendiente, densidad y patrones de drenaje, grado de erosión y fracturamiento, morfología volcánica y estructuras tectónicas y vulcano-tectónicas. Después, estas características son comparadas y separadas de unidades adyacentes que presentan diferencias importantes. La extensión de los dominios morfoestructurales depende de la escala del análisis.

La delimitación de los dominios morfoestructurales de la Región de Morelia se realizó con ayuda de todos los materiales cartográficos, además del mapa de distribución y clasificación de volcanes y un mapa de lineamientos que se elaboró al iniciar esta fase. En una primera fase se trabajó manualmente con la impresión en papel del modelo sombreado y de

pendientes, mapas topográficos y un mapa altimétrico con intervalos a cada 10 m elaborado en el software Surfer 16, todo esto a la escala de impresión 1:50 000. Simultáneamente se consultaron los demás materiales en formato digital. Posteriormente se digitalizaron y afinaron los lineamientos estructurales y dominios morfoestructurales en ArcMap 10.5 para finalmente obtener un mapa estructural y un mapa de dominios. Por último, a cada dominio se le asignó un nombre y una descripción detallada.

8.6 Cartografía geológica

Con base en la recopilación de edades isotópicas de los eventos geológicos registrados en la región se realizó una columna estratigráfica. Esto último fue útil para agrupar los eventos por temporalidad y tipo de vulcanismo en grandes eventos geológicos. Con ayuda del material cartográfico, las cartografías de referencia y datos de campo, de manera manual se delimitaron espacialmente las diferentes unidades geológicas, para posteriormente ser digitalizadas y clasificadas en ArcMap 10.5. Por último, se realizó la descripción de las unidades y los sistemas estructurales.

8.7 Trabajo de campo

Las salidas de campo tuvieron el propósito fue verificar la clasificación de geoformas volcánicas y la delimitación de dominios morfoestructurales y unidades geológicas. Se realizaron excursiones para ascender a las cimas de los volcanes: C. del Águila, al suroeste de Morelia; C. Quinceo, al noroeste de Morelia y; Sierra del Tzirate, al norte de Quiroga. En campo también se recorrió la zona norte (Morelia-Cuitzeo), sureste (Morelia-La Escalera), noroeste (Morelia-La Alberca), oeste (Morelia-Capula) y este de la región (Morelia-Charo).

8.8 Integración

En esta última fase, se integraron los resultados del análisis de geoformas volcánicas, morfoestructural y geológico bajo un enfoque de geoconservación. Mediante este, se realizó una evaluación preliminar del patrimonio geológico y sitios de geodiversidad potenciales de la región, y se exploran posibles oportunidades de desarrollo local a partir de la valoración de la geodiversidad. Además, se plantea la perspectiva holística de las estrategias de geoconservación en el manejo de áreas protegidas y propuestas.

IX. RESULTADOS

Los resultados de este trabajo se dividen en tres subcapítulos: 1) clasificación volcánica, 2) análisis morfoestructural y 3) carta geológica. Para el capítulo de clasificación volcánica se presenta el total de los edificios volcánicos contabilizados, su clasificación, distribución y ejemplos. En el capítulo de análisis morfoestructural se presentan y describen los dominios morfoestructurales de la región y sucesivamente los sistemas de lineamientos morfoestructurales. En el tercer y último capítulo de resultados se presenta la carta geológica de la Región de Morelia, la descripción de las unidades geológicas y los sistemas estructurales de la región.

Resultados 9.1 Clasificación volcánica de la Región de Morelia

La clasificación se realizó siguiendo los parámetros morfométricos que para cada tipología se sintetizan en el marco teórico de Gómez-Calderón (2018). Sin embargo, además de la subjetividad del detalle cartográfico, existe un margen de error, ya que se aprecian flujos de lavas cuyos centros eruptivos se encuentran sepultados. Por otra parte, dentro de la región se han desplazado flujos de lava cuyos centros se encuentran fuera del área de estudio, por lo tanto, estos no fueron contados.

En el área de estudio fueron identificados 216 centros eruptivos, los cuales fueron clasificados con 5 diferentes tipologías volcánicas que corresponden a: cono cinerítico (72), *spatter* (28), *maar* (1), domo (61), escudo (11), domo erosionado (40) y paleo-caldera (3) (Tabla 2; Figura 23 y 24).

Los conos cineríticos son las geoformas volcánicas con mayor representación en la región. Se contabilizaron 72 edificios con esta tipología (Figura 25). Se distribuyen en toda la porción occidental del área de estudio. En la porción oriental no se presentan conos cineríticos, con la excepción de algunos ejemplos aislados en el noreste. Se aprecian lineamientos de conos con dirección NE-SO a ENE-OSO y NO-SE, p. ej. al norte y este de Capula y al sur de la Sierra del Tzirate.

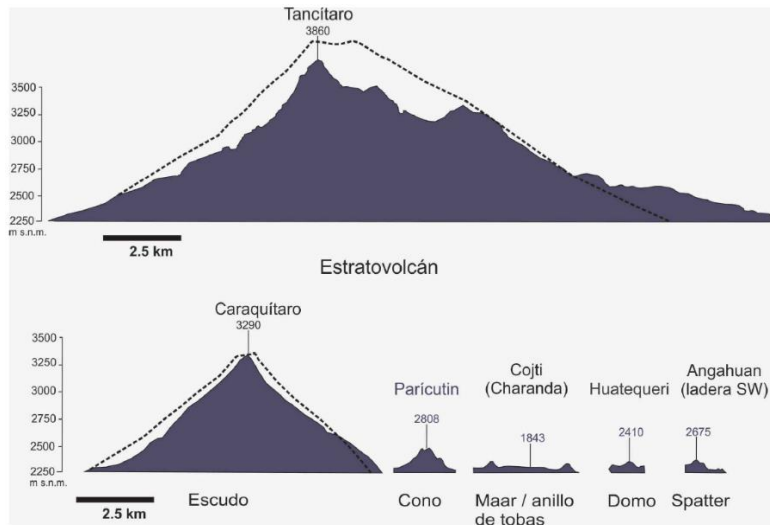


Figura 23. Perfiles topográficos de geformas volcánicas de algunos edificios del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, particularmente en la Región Volcánica del Parícutin (RVP). Con línea punteada se sugiere la paleo-forma erosionada. Para comparación se muestran algunas geformas volcánicas clasificadas de la RVP, las cuales son de tipologías análogas con las de la Región de Morelia (tomado de Corona-Chávez, 2018).

Tabla 2. Resultados de la contabilización y clasificación de los centros eruptivos de la Región de Morelia. En color azul se señala el número de edificios contabilizados en la porción que corresponde con el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, de estos suman un total de 173 edificios volcánicos. En color naranja se señala el número de edificios contabilizados en la provincia volcánica de las unidades geológicas del Oligoceno (?) - Mioceno (Sucesión Tafetán y Sierra de Mil Cumbres).

Tipología volcánica	Contabilizados
Cono cinerítico	72
<i>Spatter</i>	28
<i>Maar</i> (freatomagmático)	1
Domo	61
Escudo	11
Paleo-caldera	3
Domo erosionado	40
Total:	216

Con respecto a los edificios tipo *spatter*, de estos se identificaron 28 (Figura 26a y 26b). Se distribuyen en la porción oeste de la región, con especial concentración en el cuadrante noroeste y con ejemplos aislados en la porción centro-norte. Se encuentran lineamientos volcánicos de *spatters* con conos cineríticos orientados NE-SO a ENE-OSO. Por otra parte, solo se contabilizó un *maar* en toda el área de estudio, se trata del *maar* La Alberca, al sur de San Pedro Puruátiro (Figura 26c)

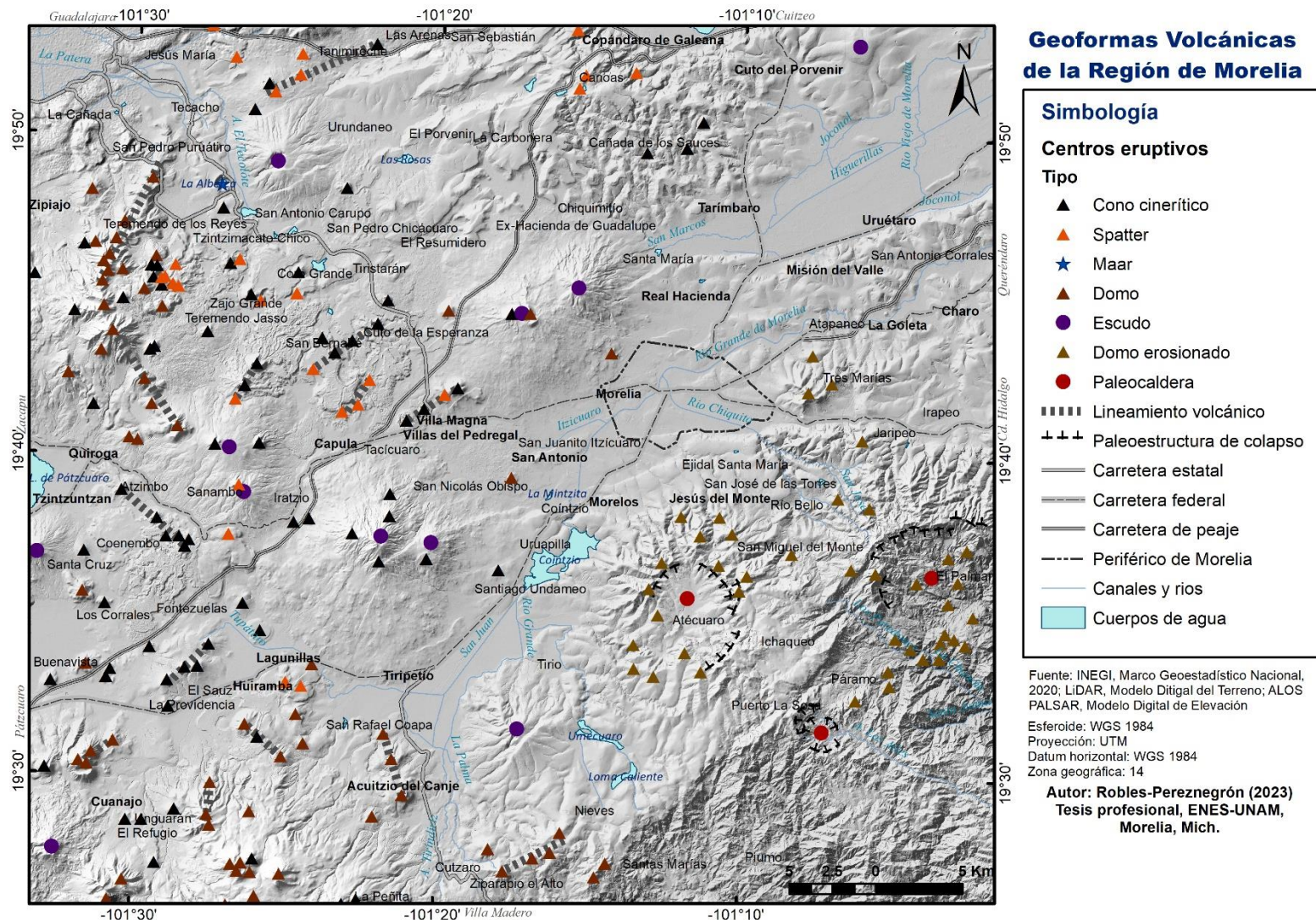


Figura 24. Mapa de ubicación y clasificación de las geformas volcánicas de la Región de Morelia. También se representan los lineamientos volcánicos con líneas discontinuas y los bordes circulares de las paleo-calderas de colapso concentradas al sureste de la región.

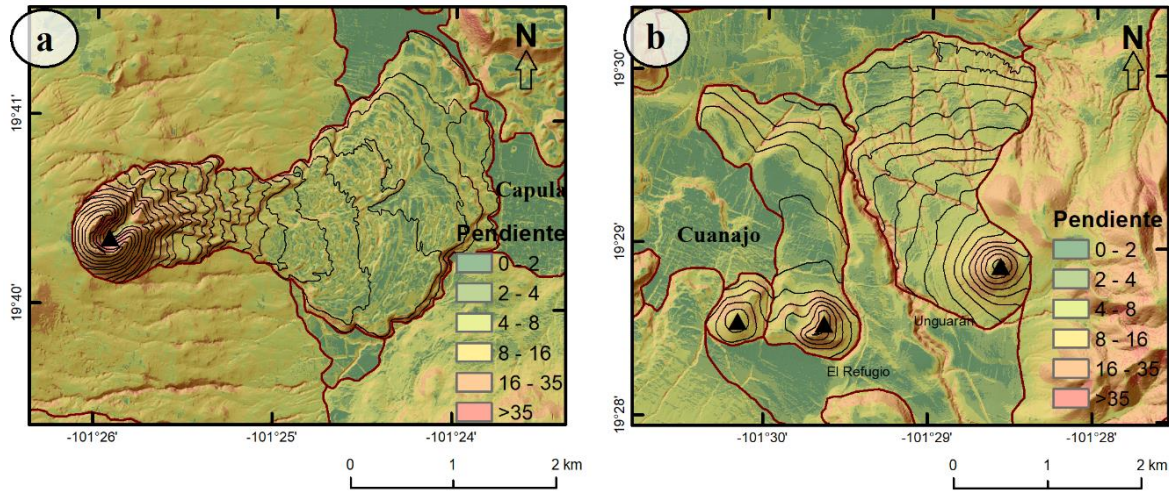


Figura 25. a) Modelo de pendientes que muestra la delimitación del cono cinerítico El Melón, con edad del Holoceno, localizado al oeste de la localidad de Capula. b) Modelo de pendientes en donde se observa la delimitación de tres conos de edad Pleistocénica al este de Cuanajo, en el cuadrante suroeste de la región. Las curvas de nivel se encuentran a un intervalo de 20 m. Se pueden apreciar los diferentes grados de erosión de los conos de la figura a y b al comparar la cercanía de las curvas de nivel en los edificios, la textura de los derrames y las pendientes. En el caso de El Melón, al ser más joven, el edificio mantiene una clara morfología cónica con cráter y pendientes mayores a 30° en sus laderas, y sus derrames se observan poco erosionados. Por otra parte, los conos de la figura b muestran una morfología de conos redondeados y derrames con pendientes suavizadas.

Los volcanes tipo domo son otra geoforma volcánica numerosa en la región, de este tipo se contabilizaron 61 (Figura 27). Estos se distribuyen en toda la porción occidente de la región, con especial expresión en el cuadrante suroeste y en la Sierra del Tzirate. Se encuentran lineamientos de domos con dirección N-S a NO-SE al sur de Lagunillas y en la Sierra del Tzirate y con dirección NE-SO a ENE-OSO p. ej. al norte de Cuanajo y en la Sierra del Tzirate.

Acerca de los volcanes tipo escudo, de estos se identificaron 11 (Figura 28). Se distribuyen de manera dispersa en toda la región, pero se concentran mayormente en el sector oeste. Un importante lineamiento morfoestructural con dirección NE-SO es el que configuran los volcanes tipo escudo El Águila-El Remolino y Quinceo-Tetillas en la porción central de la Región de Morelia. Por otra parte, el vulcanismo de la porción oriental del área de estudio es representado de manera importante por las estructuras de calderas de colapso que se concentran en el cuadrante sureste y productos volcánicos asociados, en el área denominada Sierra de Mil Cumbres.

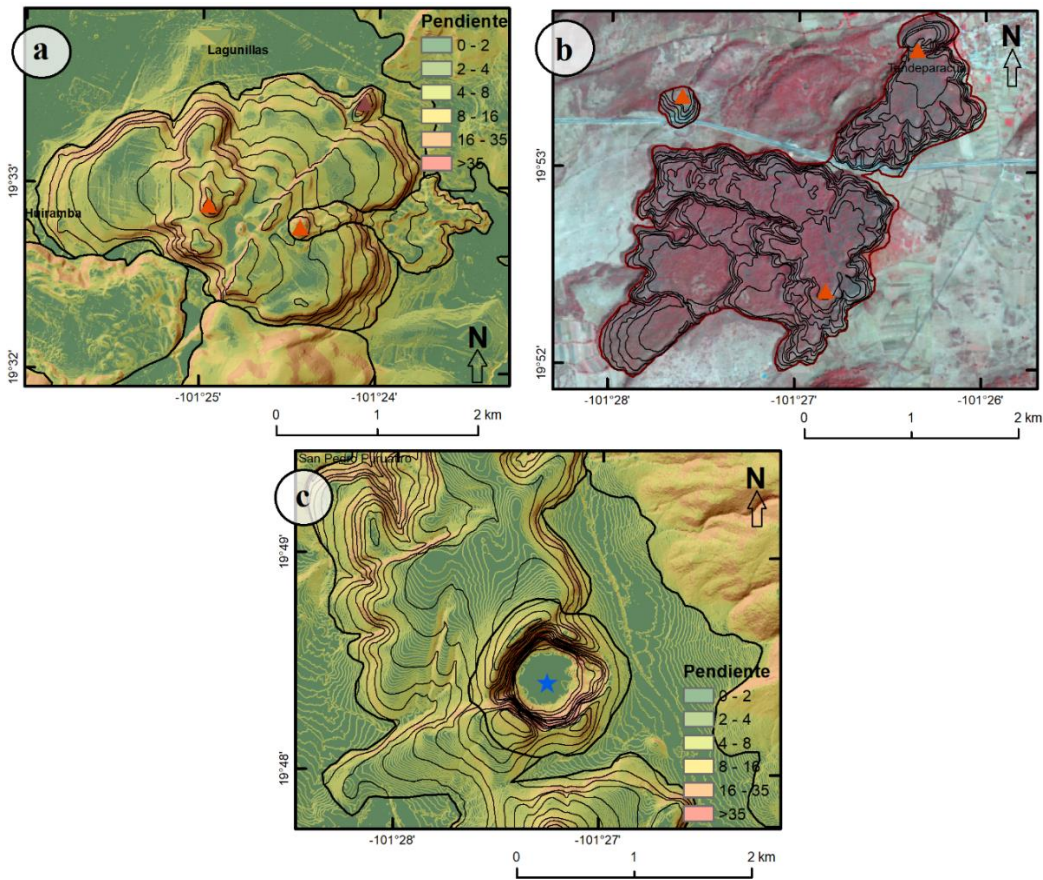


Figura 26. a) Modelo de pendientes que muestra la delimitación de dos centros de emisión de tipo *spatter* al sur de Lagunillas y este de Huiramba. b) Imagen satelital SPOT 6 con acercamiento a tres *spatters* y sus derrames, al sur de Tendeparacua, en el noroeste del área de estudio. Las curvas de nivel se encuentran a intervalos de 20 m. En estos ejemplares se pueden observar los pequeños edificios volcánicos tipo *spatters*, menores a 100 m de altura, en ocasiones casi imperceptibles, y los derrames de lava formados típicamente por un estilo eruptivo tipo hawaiano. c) Modelo de pendientes donde se muestra el único *maar* de la región, el *maar* La Alberca de Teremendo, al noroeste de la región.

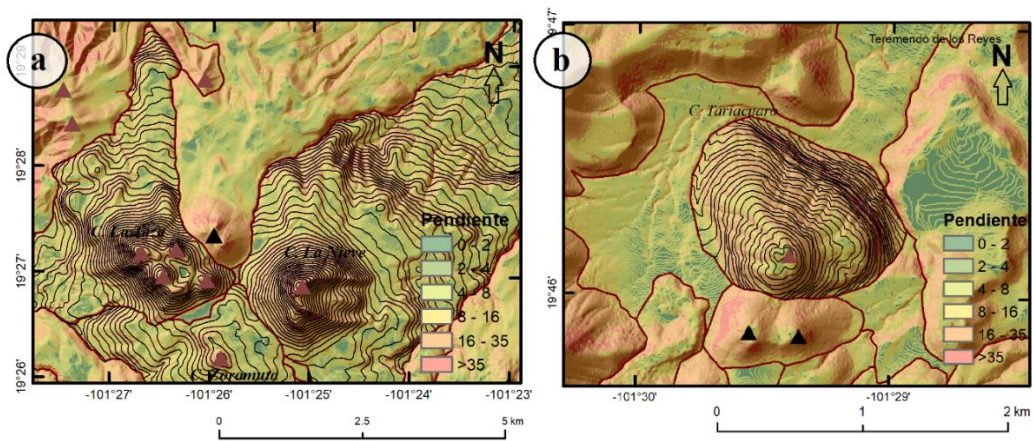


Figura 27. Ejemplos de geformas volcánicas de domos en la Región de Morelia. a) Modelo de pendientes en donde se observan a los domos La Nieve, La Taza y Zoromuta, al suroeste de Acuitzio del Canje. b) Modelo de

pendientes en donde se observa al domo Tariacuaro, al este de la Sierra del Tzirate y sur de Teremendo de los Reyes. Se puede resaltar una característica especial de las geoformas de domos y es que presentan una pendiente fuerte a abrupta en sus laderas proximales, como se puede ver en estos ejemplos, esta característica está relacionada con la viscosidad de sus derrames. A diferencia de los domos Pleistocénicos La Taza y La Nieve, el domo Zoromuta de edad Pliocénica (Cardona-Melchor, 2015) presenta laderas con pendientes moderadas a suaves, indicativo de su mayor edad y por lo tanto de un mayor grado de erosión.

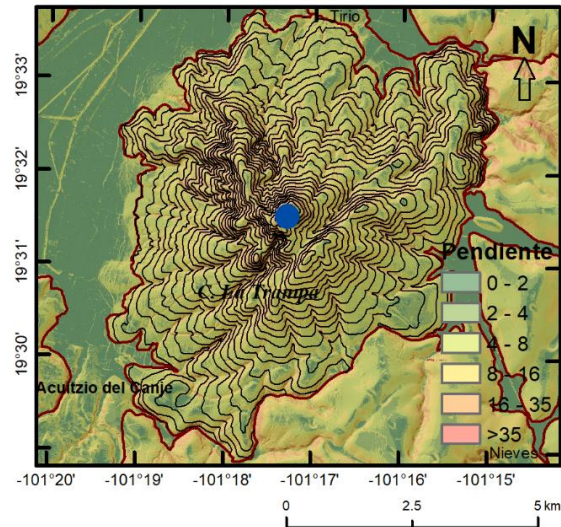


Figura 28. En la figura se observa al volcán tipo escudo La Trampa, al sur de Tiro. Se trata de un volcán tipo escudo caracterizado por laderas con pendientes moderadas a suaves menores a 16° de inclinación, un desnivel de 500 m y un diámetro mayor de aproximadamente 9 km.

Se identificaron tres paleo-calderas de colapso y en el mapa se coloca la simbología en el centro de la depresión volcánica (Figura 29). Dos de estas calderas de colapso ya han sido estudiadas anteriormente más a detalle (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015), mientras en este trabajo se propone la ubicación de una tercera caldera de colapso, al sur de las primeras dos (Figuras 24 y 29b). Esta propuesta se realiza con base en elementos morfológicos y de análisis morfoestructural, y es respaldado por lo descrito anteriormente de la unidad Ignimbrita Puerto La Sosa (Pasquarè *et al.*, 1991). La localidad tipo Puerto la Sosa se ubica al noroeste de la posible caldera y el fechamiento publicado fue realizado al suroeste de la misma. Esta ha sido denominada caldera Puerto La Sosa. En cuanto a la clasificación de domos erosionados, se contabilizaron 40, sin embargo, esta es la clasificación con mayor incertidumbre debido a que las geoformas naturalmente erosionadas de edificios tipo domo con edades del Mioceno dificultan su plena identificación.

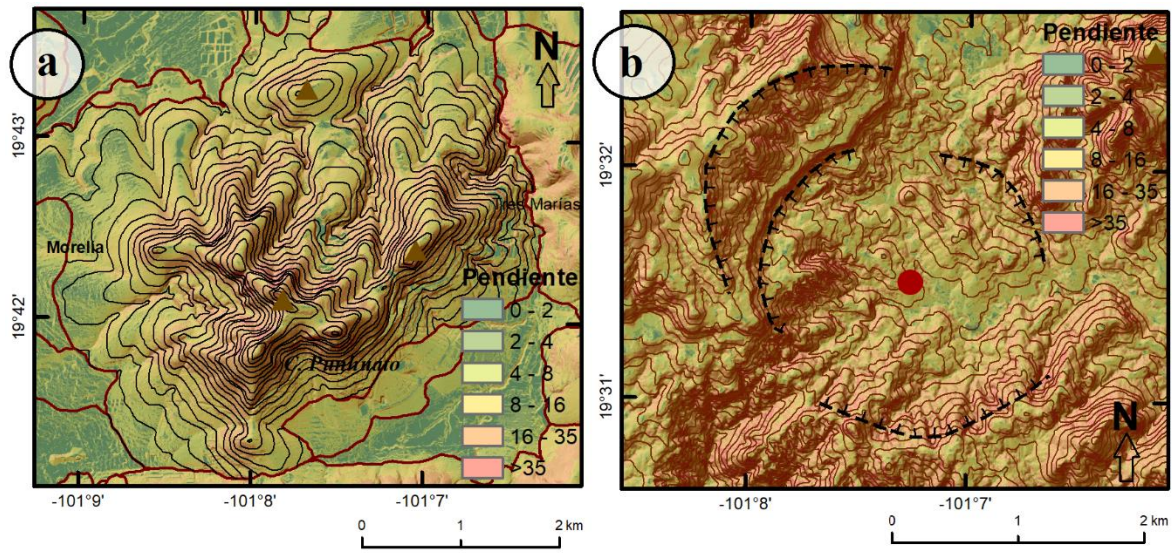


Figura 29. a) Complejo de domos al este de Morelia (C. Punhuato), muy representativos del paisaje de la ciudad de Morelia. Se pueden comparar las geoformas de domos de la figura 26 con la de estos paleo-domos donde el fallamiento y la erosión claramente ha modificado su geoforma original. b) Se muestra la depresión volcánica de la paleo-caldera de colapso que en este trabajo se propone, caldera Puerto La Sosa.

Resultados 9.2 Análisis morfoestructural

Se presentan los resultados del análisis morfoestructural de la Región del municipio de Morelia. Se describen en la primera parte los dominios morfoestructurales, los cuales son predominantemente de origen volcánico, y sucesivamente los lineamientos morfoestructurales, los cuales han dislocado o han condicionado las características distintivas de las geoformas volcánicas y los procesos de renovación de paisaje por procesos tectónicos.

9.2.1 Dominios morfoestructurales de la Región Morelia

En este apartado se presentan 18 dominios morfoestructurales de la Región de Morelia (Figura 30). Las descripciones de los dominios y subdominios incluyen su definición relacionada espacialmente con alguna localidad tipo con su nomenclatura, así como su descripción que incluye la localización, su distribución espacial, sus geoformas distintivas, así como sus rasgos físico-geográficos representativos, tales como la altura, pendientes y sus relaciones con los asentamientos humanos. El orden de los dominios está relacionado con la temporalidad, de lo más antiguo a lo más joven, de los procesos geológicos y morfogenéticos que han dado lugar a un paisaje representativo para cada dominio morfoestructural.

9.2.1.1 Sierra y paleo-caldera La Escalera

Se encuentra en la porción sureste de la Región de Morelia, con una orientación prevalente de dirección NE-SO. En la zona no hay grandes poblaciones urbanas, solo pequeñas poblaciones rurales. En el límite norte del dominio se ubica la localidad de Jaripeo, en la zona interna de la caldera se ubican las localidades de El Palmar y La Escalera, y en la parte centro este se ubica Puerto La Sosa, entre otras. Abarca porciones de los municipios de Charo, Tzitzio, Madero y Morelia. Desde Morelia se accede fácilmente por la carretera federal no.15 llamada carretera a Mil Cumbres. Desde el punto de vista de dominios de paisaje, se ubica al este del dominio Paleo-caldera de Atécuaro y el subdominio La Trampa y Domos, así como al sur del dominio Subcuenca Morelia-Charo.

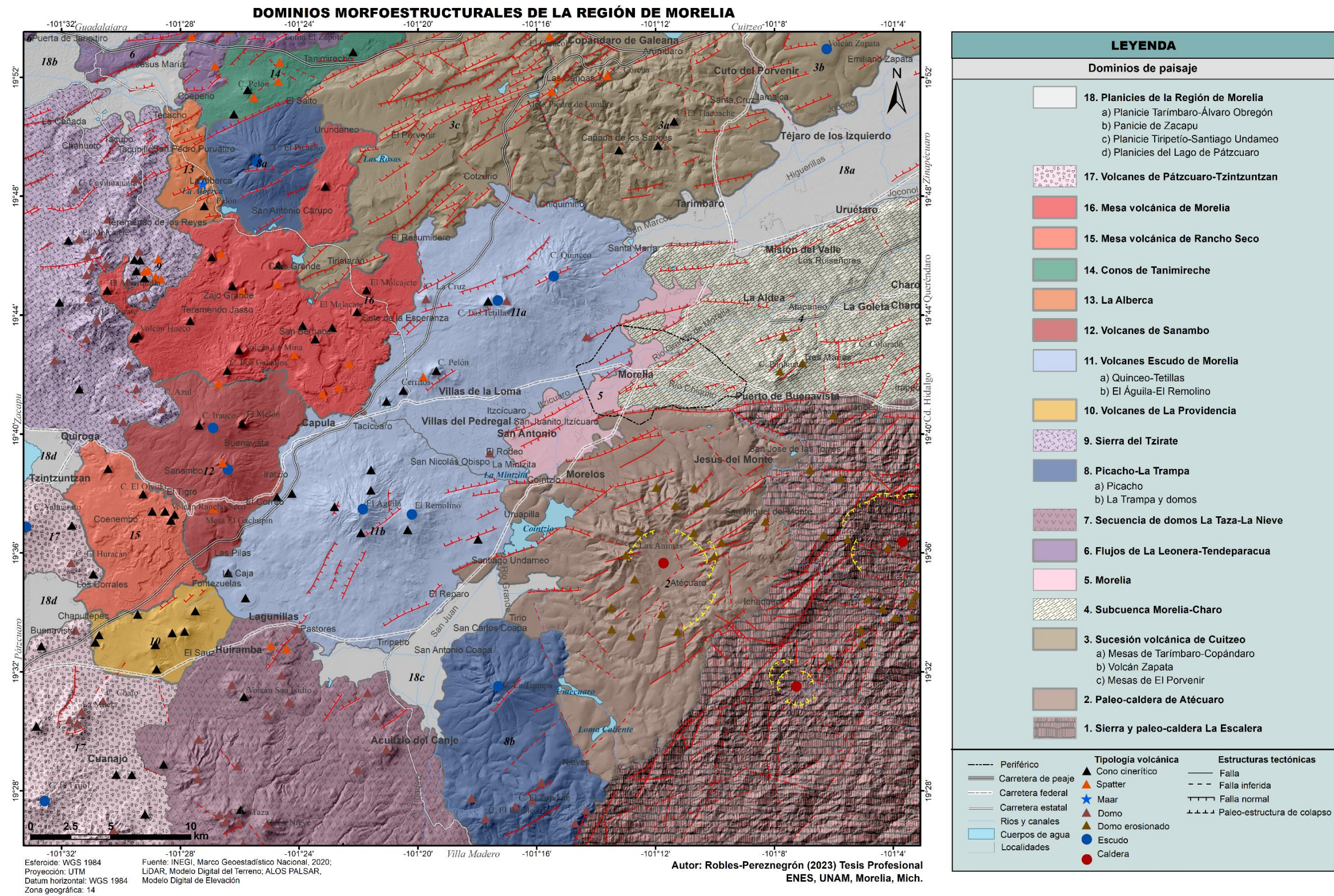


Figura 30. Mapa de dominios morfoestructurales (dominios de paisaje) de la Región de Morelia.

Es un dominio de sierra caracterizado por una sucesión de productos volcánicos del Mioceno (con algunas edades del Oligoceno; Pasquaré et al., 1991; Gómez-Vasconcelos et al., 2015) y por una sobresaliente paleo-estructura de caldera de colapso llamada La Escalera, así como por depósitos volcánicos re-transportados (avalanchas y lahares) relativamente sin-genéticos y recientes. Las geoformas de sierra y la paleo-estructura volcánica han sido afectadas por un alto grado de erosión, fallamiento y fracturamiento.

Abarca un área de 390 km² y del municipio de Morelia cubre 89 km², el 7.5%. Es delimitado al este por una estructura tectónica de primer orden NE-SO de aproximadamente 30 km y al norte por una estructura de primer orden con dirección E-O relacionada con el Sistema de Fallas Morelia-Acambay.

Predomina un relieve montañoso y escarpado con profundos valles, caracterizado por una depresión volcánica en su sección norte. Esta última corresponde a la depresión de la paleo-caldera La Escalera, la cual presenta una estructura vulcano-tectónica con forma semicircular, altamente fracturada, con un diámetro de 7 km, circundada parcialmente por remanentes de domos de lava y depósitos volcánicos re-transportados. Al suroeste de esta última y al este de la localidad Puerto La Sosa, se propone la ubicación de otra paleo-caldera de menores dimensiones, esta presenta una estructura circular con un diámetro aproximado de 2.5 km y también se observan domos circundantes principalmente en el borde noroeste. Con respecto a los valores de elevación del dominio, la altura máxima es de 2600 m s.n.m. en los cerros Pico Azul y El Zarzal, al norte de la caldera La Escalera, y las mínimas son de 1200 m s.n.m. en la cañada del río La Chareña, este último representa un lineamiento con orientación NO-SE, aproximadamente 6 km al sur de El Palmar. Con respecto a la inclinación del terreno, predominan las pendientes fuertes, mayores a 15° a lo largo de todo el dominio, con pendientes generalmente abruptas mayores a 30° en las cumbres del paisaje de sierra, en las laderas internas de la caldera y en los límites escarpados de la estructura regional que delimita al dominio con dirección NE-SO. El dominio es deformado y dislocado por al menos tres sistemas de lineamientos morfoestructurales con direcciones NO-SE, NE-SO y E-O.

Los patrones de drenaje dominantes son de tipo dendrítico a subdendrítico muy bien desarrollados, sin embargo, se observa un sistema de drenaje radial en las laderas externas de la caldera La Escalera.



Figura 31. Panorámica tomada desde el mirador de la localidad Paseo de Las Nubes, aproximadamente a 2 km al este del límite del dominio sierra y paleo-caldera La Escalera, desde su límite norte. Se observa, desde su zona de parteaguas, al sur, la depresión de la región hidrográfica del Balsas y el característico paisaje de sierra de este dominio.

De manera aproximada, la zona de parteaguas entre las regiones hidrográficas Lerma-Santiago y Balsas es delimitada a lo largo de todo el límite oeste del dominio y el borde norte de la paleo-caldera La Escalera.

Cabe subrayar que representa al dominio más antiguo y extenso, con la topografía más accidentada y las cotas más bajas de toda la región.

9.2.1.2 Paleo-caldera de Atécuaro

Es un dominio distinguido por una depresión volcánica circular formada por la estructura de la paleo-caldera de Atécuaro, la cual es rodeada por un conjunto de domos erosionados y mesetas de ignimbrita, dislocados sobre todo por fallas y fracturas con dirección NE-SO.

Posee una superficie de 282 km² y se ubica en la porción sureste de la Región de Morelia, al sur del dominio Subcuenca Morelia-Charo y al oeste del dominio La Escalera. Al norte es delimitado por una estructura normal de primer orden con dirección E-O relacionada al Sistema de Fallas Morelia-Acambay y al este por otra gran estructura regional de primer orden con dirección NE-SO que separa a este dominio del dominio sierra y paleo-caldera La Escalera. La ciudad de Morelia se extiende hacia la parte norte de este dominio, donde también se encuentran las localidades de Morelos, Jesús del Monte y San Miguel del Monte. En el centro de la caldera se ubican las localidades de Atécuaro y Zimpanio Sur y al sureste se encuentra Ichaqueo. Se puede ingresar a la zona a través de la carretera federal no.14, la cual se conecta con calles y avenidas que se dirigen hacia la localidad de Atécuaro. En el

límite oeste del dominio se localiza el cuerpo de agua superficial más extenso de la región, la presa de Cointzio. También al sur se encuentran dos presas de menores dimensiones, las presas de Umécuaro y Loma Caliente. Abarca 281 km² del municipio de Morelia, esto corresponde al 24% de su territorio.

Es representado por un relieve de montañas bajas a intermedias y mesas erosionadas que rodean a la depresión volcánica formada por la caldera de colapso de Atécuaro. La caldera de Atécuaro muestra un borde de caldera circular con algunos domos de lava erosionados, con un diámetro aproximado de 5 km y paredes internas con pendientes fuertes >20° en la porción norte y pendientes moderadas <15° en la porción sur y desniveles de 100 a 350 m. Las montañas bajas a intermedias corresponden a los flujos de lavas de la Sierra de Mil Cumbres (Gómez-Vasconcelos et al., 2015) con pendientes fuertes a abruptas >25° como por ejemplo el Cerro Las Animas, al oeste de la caldera. En los domos erosionados predominan las pendientes moderadas a fuertes <20°. Por otra parte, en las cimas relativamente planas de las mesas de ignimbritas las pendientes son suaves <4°. La altura máxima del dominio es de 2640 m s.n.m. al oeste de Ichaqueo y la mínima es de 1900 m, con alturas intermedias en la depresión de Atécuaro donde el punto más bajo es de 2220 m s.n.m. Las redes de drenaje se muestran bien desarrolladas y predomina un patrón de drenaje radial centrífugo dispuesto en las laderas externas de la paleo-estructura de la caldera de Atécuaro.

9.2.1.3 Sucesión volcánica de Cuitzeo

Representa a un conjunto de mesas dislocadas, basculadas y erosionadas, construidas por la superposición de un extenso volumen de flujos de lava y productos piroclásticos.

Se localiza en el límite norte de la Región de Morelia, al sur del lago de Cuitzeo y con respecto a los dominios de paisaje, al norte de la Planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón y el subdominio Quinceo-Tetillas. Presenta una orientación general con dirección E-O, tiene una longitud de 38 km, un ancho promedio de 10 km y cubre una superficie de 340 km². Del municipio de Morelia abarca un área de 87 km². El dominio presenta tres sectores con características morfoestructurales distintivas por lo que este se dividió en tres subdominios: a) Mesas de Tarímbaro-Copándaro, b) Volcán Zapata y c) Mesas de El Porvenir. A continuación, se describe cada uno.

a) Subdominio mesas de Tarímbaro-Copándaro

Es un subdominio conformado por una secuencia de flujos de lavas, ignimbritas y depósitos de caída, caracterizado por un relieve socavado por estructuras tectónicas y una red de drenaje que comparte direcciones preferentes.

Se ubica en la porción central del dominio y abarca un área de 146 km². Dentro de este subdominio se sitúan las localidades de Tarímbaro, Copándaro de Galeana y Las Canoas, y forma parte de los municipios de Tarímbaro y Copándaro. Al norte la secuencia es delimitada por una estructura en forma de tijera formada por la intersección de dos grandes lineamientos estructurales con direcciones NO-SE y NE-SO.

Se trata de un conjunto de mesas alargadas y colinas rodeadas por barrancos. Dentro del subdominio, construido esencialmente por una secuencia de productos volcánicos, también se encuentran de forma aislada a 3 pequeños conos cineríticos anteriormente identificados por Hasenaka y Carmichael (1985a y 1985b) y 3 edificios tipo spatter. En los barrancos predominan las pendientes fuertes >20° y pendientes suaves <4° en las cimas de las mesas. El subdominio es cortado por estructuras inferidas con dirección NO-SE y estructuras normales con dirección NE-SO y E-O. La altura máxima es de 2420 m s.n.m. en el Cerro Largo, al oeste de Las Canoas y las mínimas son de 1840 m s.n.m. al norte del dominio, margen sur del lago de Cuitzeo. Predomina un patrón de drenaje subdendrítico con los mayores afluentes orientados al NO-SE.

b) Subdominio volcán Zapata

Es una mesa de productos volcánicos que se distingue por ser coronada por el volcán Zapata, un volcán tipo escudo con un *spatter* somital de 8.11-6.75 Ma (Trujillo-Hernández, 2017).

Se encuentra en el sector oeste del dominio Sucesión Volcánica de Cuitzeo, al sur del Lago de Cuitzeo y norte de la Planicie Tarímbaro-Álvaro-Obregón. Cubre una superficie de 41 km². Es parte de los municipios de Tarímbaro, Álvaro Obregón y Cuitzeo. El subdominio está rodeado por varias pequeñas localidades entre las cuales se encuentra Cuto del Porvenir al oeste.

Este subdominio presenta morfología de mesa sobreyacida por un volcán tipo escudo de tamaño mediano con cima plana. Es cortado por estructuras de fallamiento normal con dirección ENE-OSO que buzcan al NO. Predominan las pendientes suaves <6° en las superficies elevadas del subdominio y bordes con pendientes moderadas a fuertes entre 10-

25°. La vertiente norte del volcán es particularmente escarpada con pendiente $>30^\circ$, generada por una estructura normal con dirección ENE-OSO que corta al edificio. La altura máxima es de 2160 m s.n.m. en la cima del volcán Zapata y la mínima es de 1840 m s.n.m. El patrón de drenaje dominante es sub-paralelo con afluentes orientados al ENE-OSO, los cuales se unen a las corrientes que rodean al dominio.

c) Subdominio mesas de El Porvenir

Es un conjunto de mesas alargadas, dislocadas por una alta densidad de estructuras de cinemática extensional con direcciones ENE-OSO y NE-SO y basculadas al SE (Figura 32).

Se encuentra en la porción occidental del dominio Sucesión Volcánica de Cuitzeo. Con respecto a los dominios de paisaje, se ubica al noreste del dominio Mesa Volcánica de Morelia y al norte del subdominio Quinceo-Tetillas. Es delimitado al este por una estructura inferida de segundo orden con dirección NO-SE que lo separa del subdominio Mesa Volcánica Central. Contiene a las localidades de Tiristarán, El Porvenir y La Carbonera, entre otras pequeñas localidades, y abarca un área de 153 km². Cubre 87 km² del municipio de Morelia, lo cual corresponde al 7% de su territorio.



Figura 32. Panorámica tomada al norte de la localidad El Porvenir, con vista hacia el norte. Se observa un amplio graben con orientación ENE-OSO, característico del relieve de este dominio, configurado recientemente por estructuras con esta misma dirección.

Predomina un relieve de mesas y quebradas. Las pendientes son suaves menores a 5° sobre las mesas y pendientes fuertes a abruptas mayores a 20° en los escarpes de fallas y las laderas erosivas de los valles. La altura máxima es de 2440 m s.n.m. en la Mesa Piedra de Lumbre, 3 km al noroeste de La Carbonera, con alturas intermedias de alrededor de 2200 al oeste del

dominio, cerca de Tiristarán, y la cota mínima es de 1840 m s.n.m. en las proximidades al lago de Cuitzeo. Predomina un patrón de drenaje subparalelo en donde los afluentes menores tienden a ser paralelos con dirección NNO-SSE y se unen perpendicularmente a afluentes principales con dirección ENE-OSO y NE-SO.

9.2.1.4 Subcuenca Morelia-Charo

Representa un bloque con orientación E-O constituido por una secuencia de flujos de lava e ignimbrita que subyacen concordantemente a los depósitos fluvio-lacustres de una antigua subcuenca, rematado por depósitos piroclásticos del Pleistoceno (Israde-Alcántara, 1995; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999).

Presenta una orientación prevalente con orientación E-O, con una longitud de 20 km y un ancho promedio de 10 km, en un área de 196 km². Se ubica en el límite este-central de la Región Morelia, al sur del subdominio Planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón, al norte de los dominios Sierra y Paleo-caldera La Escalera y Paleo-caldera de Atécuaro y al este del dominio Morelia (Figura 33).



Figura 33. Panorámica del paisaje de la Subcuenca Morelia-Charo, con vista hacia el norte y tomada desde el C. Colorado, al este de Ciudad Tres Marías.

Es delimitado por estructuras de primer orden, al norte por una estructura regional relacionada al Sistema de Fallas Morelia-Acambay con dirección ENE-OSO que delimita el bajo estructural en donde se sitúa la Planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón y al sur por otra estructura relacionada al mismo sistema conocida como falla Morelia (también nombrada La Paloma) con orientación E-O. En este dominio se extiende la porción este de la ciudad de Morelia, además de las localidades de Tres Marías, Atapaneo, La Goleta, Charo e Irapeo. A

través de este dominio pasa el río Grande de Morelia con dirección NE-SO dirigiéndose hacia la parte baja del dominio Morelia, el límite norte es atravesado por el río Joconol y al suroeste pasa el río Chiquito. Abarca 87 km² del Municipio de Morelia, el 7%.

Se trata de un relieve volcánico y fluvio-lacustre de lomeríos y montañas medias (Figura 34). Es afectado por lineamientos estructurales con dirección N-S, E-O y NE-SO. La altura máxima se encuentra a 2320 m s.n.m. en la cima del cerro Punhuato y la mínima es de 1860 m s.n.m. en las zonas próximas al curso del río Grande de Morelia. Las pendientes son suaves a moderadas menores a 10° en los lomeríos y moderadas a fuertes entre 10-30° en las laderas del Punhuato y el Cerro Colorado. Predomina un patrón de drenaje subparalelo a subdendrítico con afluentes paralelos y dendríticos que descienden de los lomeríos y montañas medias para unirse principalmente a los ríos Joconol y Grande.

Al suroeste del dominio Subcuenca Morelia-Charo se sitúan las lomas bajas en donde fue fundada la ciudad de Valladolid (hoy Morelia).



Figura 34. Lomas bajas y cañadas del dominio Subcuenca Morelia-Charo, al este del hospital de alta especialidad ISSSTE.

9.2.1.5 Morelia

Representa un estrecho bajo estructural que comprende al sector con la topografía más baja de la ciudad de Morelia (Figura 35).

Posee una forma estrecha y alargada con orientación general NE-SO, con una longitud aproximada de 15 km y un área de 37 km². Se localiza al centro de la Región de Morelia, al este-sureste del subdominio Quinceo-Tetillas, al noreste del subdominio El Águila y al oeste del dominio Subcuenca Morelia-Charo. Es limitado al noroeste por el lineamiento morfoestructural con dirección NE-SO que forma el dominio volcanes escudo de Morelia, al

sureste por lomas bajas con orientación NE-SO del dominio Subcuenca Morelia-Charo y la falla Cerritos con dirección ENE-OSO. Recorre a la ciudad de Morelia de suroeste a noreste y abarca distintas colonias como San Juanito Itzícuaru, Adolfo López Mateos, Lomas del Valle, Tres Puentes, Las Flores, Industrial, Prados Verdes, Los Manantiales etc., así como parte del manantial La Mintzita, algunas de estas colonias son bien conocidas por sus recurrentes problemas de inundaciones. En esta zona confluyen los dos ríos principales de la ciudad: el río Grande y el río Chiquito. Abarca 36 km² del municipio de Morelia, que corresponde al 3%.

Corresponde a una pequeña llanura con lomas bajas. Representa un valle con pendientes planas a ligeramente suaves menores a 3°, con la excepción de una loma baja y alargada de ignimbrita que se sitúa al suroeste del dominio en San Juanito Itzícuaru, limitada por fallas normales con dirección NE-SO y escarpes de falla con pendientes fuertes mayores a 15°. La altura máxima es de 1960 m s.n.m. en un banco de material al oeste de San Juanito Itzícuaru y la mínima es de 1900 m, la cual se mantiene en casi todo el dominio. La red hidrográfica de esta zona es controlada por el río Grande, el cual recibe aportes de corrientes superficiales provenientes del dominio volcanes escudo de Morelia, caldera de Atécuaru y subcuenca Morelia-Charo.

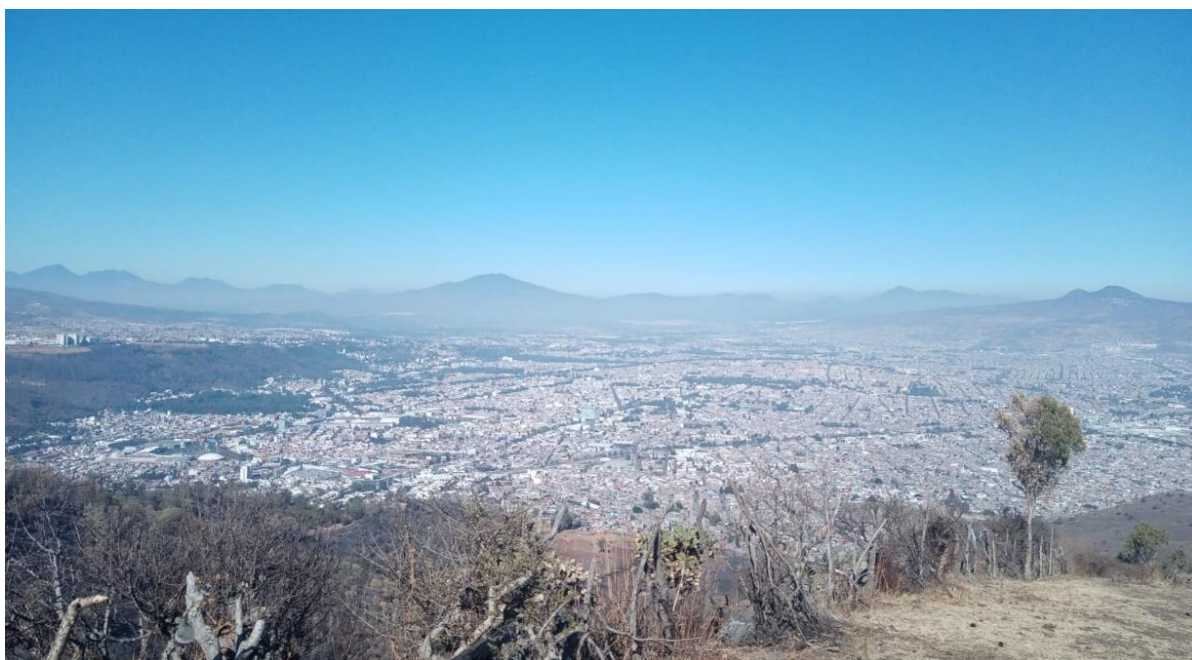


Figura 35. Panorámica de la mancha urbana central de la ciudad de Morelia, tomada desde la ladera oeste del C. Punhuato.

9.2.1.6 Flujos de La Leonera-Tendeparacua

Se caracteriza por un gran flujo de lavas del Plioceno provenientes del volcán La Leonera, dislocado y limitado por estructuras normales con dirección NE-SO y E-O. En la parte central del dominio es cubierto por los derrames de lava jóvenes (Holoceno) del *spatter* de Tendeparacua (Kshirsagar *et al.*, 2015).

Tiene un área de 30 km² y se ubica en el límite noroeste de la Región de Morelia, al norte de los dominios Conos de Tanimireche y La Alberca de Guadalupe y al oeste y suroeste es rodeado por la Planicie de Zacapu. En este dominio se sitúan algunas pequeñas poblaciones como Tendeparacua, Coeperio y Puerta de Jaripitiro. Se encuentra dentro de los municipios de Huaniqueo y Chucándiro

Se trata de un relieve de montañas bajas con estructuras de semigraben y jóvenes mesas de lava. En la zona se identifican 3 centros eruptivos de tipo *spatter*. La altura máxima es de 2290 m s.n.m. en la Loma El Zapote, al este de Tendeparacua, y la mínima es de 1900 m s.n.m. al este del dominio, en donde se aproxima al lago de Cuitzeo. Predominan las pendientes suaves <4° en los malpais, las pendientes fuertes >15° en las laderas de las montañas bajas y las pendientes abruptas >25° en los escarpes de fallas. El drenaje predominante tiende a ser subparalelo.

9.2.1.7 Sucesión de domos La Taza - La Nieve

El dominio sucesión de domos La Taza-La Nieve es un macizo volcánico distinguido por una alta concentración de centros volcánicos y flujos de lava, en su mayoría domos, con los domos La Taza y La Nieve en las cumbres más altas del dominio.

Es un dominio con un área de 197 km² y se ubica en el límite sur de la Región de Morelia. Con respecto a los dominios de paisaje, se encuentra al oeste del subdominio La Trampa y Domos y al este del dominio Volcanes de Pátzcuaro-Tzintzuntzan. Al norte se ubican las localidades de Lagunillas y Huiramba, y al este, Acuitzio del Canje. Forma parte de los municipios de Acuitzio, Huiramba, Pátzcuaro, Lagunillas y Morelia. Del municipio de Morelia cubre 27 km², el 2% de su territorio.

Se trata de un relieve montañoso configurado por la superposición de edificios volcánicos de tipo domo, cono y *spatter*. En total, en el dominio se aprecian 27 centros eruptivos de los

cuales 20 fueron clasificados como domos, 2 *spatters* y 5 conos. La altura máxima se ubica en la cima del domo La Nieve a 3420 m s.n.m. y la mínima es de 2020 m en el límite noreste del dominio. Las laderas de todo el complejo se inclinan de manera general hacia el norte con pendientes suaves a moderadas menores a 10°, y pendientes mayores a 20° sobre las laderas de los edificios volcánicos. Las redes de drenaje se encuentran bien desarrolladas con tendencias a un tipo de drenaje dendrítico, más acentuado en la parte centro a sur del complejo y controlado por la pendiente general al norte.

La cima del domo La Nieve representa el punto más alto de toda la región y uno de los más altos de todo el estado.

9.2.1.8 Picacho-La Trampa

Es un dominio conformado por domos de lava y volcanes tipo escudo, que se caracteriza por las destacadas geoformas de dos volcanes tipo escudo denominados Picacho y La Trampa, ambos con morfometría similar.

Este dominio abarca un área de 146 km² y se encuentra dividido geográficamente en dos subdominios: a) Picacho y b) La Trampa y Domos. Ambos presentan una orientación general NNO-SSE y son delimitados por lineamientos inferidos con dirección NNO-SSE.

a) Subdominio Picacho

Representa a un volcán en escudo de tamaño mediano denominado Picacho.

Tiene un área de 42 km² y una orientación general NNO-SSE, con un eje mayor de 8 km y un ancho de 6 km. Se ubica en la porción noroeste de la RM, al este del dominio La Alberca y al sur del dominio Conos de Tanimireche. Es delimitado al norte por una estructura de falla normal con dirección ENE-OSO relacionada al Sistema de Fallas Morelia-Acambay. Forma parte de los municipios de Morelia, Chucándiro y Huaniqueo, y al sur del Picacho se ubica la localidad de San Antonio Carupo. Del municipio de Morelia abarca 23 km², el 2%.

Presenta un relieve de montaña media con desarrollo de cárcavas en sus laderas. Es dislocado por estructuras normales de segundo orden que buzan al noroeste con dirección ENE-OSO. La altura máxima es de 2550 m s.n.m., en la cima del Picacho, y la mínima es 2090 m al noroeste del subdominio. Las pendientes de las laderas del volcán Picacho son suaves a

moderadas menores a 10° y fuertes mayores a 20° en las pendientes de las cárcavas y los escarpes de fallas que cortan al edificio. El patrón de drenaje es radial bien desarrollado.

b) Subdominio La Trampa y Domos

Es un subdominio formado por un volcán en escudo de tamaño mediano llamado La Trampa y un conjunto de domos alineados con dirección NE-SO.

El subdominio tiene un área de 104 km² y una orientación general NNO-SSE, con una longitud de 15 km y un ancho promedio de 7 km. Se encuentra al oeste del dominio Sucesión de domos La Taza-La Nieve y al suroeste del dominio caldera de Atécuaro. Es delimitado al este y oeste por lineamientos morfoestructurales inferidos con dirección NNO-SSE. Forma parte de los municipios de Acuitzio, Morelia y Madero. Del municipio de Morelia abarca 36 km², el 3%. Entre las pequeñas localidades que contiene, al norte se encuentra Tirio y en el extremo sur Zirapio el Alto.

Presenta un relieve de montaña media con desarrollo de cárcavas y montañas bajas escarpadas. Es dislocado por estructuras distensivas con dirección NE-SO. Además del volcán tipo escudo La Trampa, al sur del subdominio, cerca de Zirapio el Alto, se concentran 7 domos, los más altos son los domos El Zopilote y El Pozole a 2500 m s.n.m. La altura máxima es de 2520 m s.n.m. en la cima de La Trampa y la mínima es de 2020 m en el límite norte y oeste del subdominio, contiguo a la planicie de Tiripetío-Santiago Undameo. En las laderas de La Trampa predominan las pendientes suaves a moderadas menores a 10° mientras en las laderas de los domos se muestran pendientes fuertes a abruptas mayores a 25°. En las laderas de La Trampa el drenaje es de tipo radial bien desarrollado y en la zona donde se distribuyen los domos el drenaje es de tipo dendrítico a subdendrítico.

El lineamiento de domos con dirección NE-SO al sur del subdominio establece parte del parteaguas que divide a las dos regiones hidrográficas de la región: Lerma-Santiago y Balsas.

9.2.1.9 Sierra del Tzirate

Se trata de un dominio en forma de sierra construido por la alineación de domos de lava que en la porción sur se orientan al NO-SE y en el norte se orienta al NNE-SSO.

Este dominio abarca un área de 174 km², sobresale su forma de montaña alargada (sierra), su porción sur se orienta al NNO-SSE con longitud de 10 km y su porción norte se orienta al

NNE-SSO con longitud aproximada de 12 km. Se localiza en el límite oeste de la Región de Morelia, al sur de la Planicie de Zacapu, al oeste del dominio Mesa Volcánica de Morelia y al norte del dominio Mesa Volcánica de Rancho Seco. Forma parte de los municipios de Quiroga, Coeneo, Huaniqueo y Morelia. Al sur del dominio se ubica la localidad de Quiroga, en la parte media oriental se encuentra Teremendo de los Reyes y al norte La Cañada, entre otras. Del municipio de Morelia cubre un área de 26 km², el 2%.

Es un relieve de montaña alargada compuesta por geofomas volcánicas de domos, conos cineríticos y spatters (Figura 36). Presenta un total de 35 centros eruptivos de composición dacítica a andesítica (Pérez-Orozco *et al.*, 2018). Está conformada por 22 domos, que en su mayoría se concentran en las cumbres a lo largo de la Sierra, 8 conos y 5 volcanes tipo *spatter*. La Sierra es cortada en su porción norte por estructuras normales con dirección ENE-OSO y al sur se infieren algunas estructuras con dirección NO-SE. Presenta una altura máxima en la cima del domo El Tzirate de 3320 m s.n.m. y una mínima de 2000 m en su base norte donde afloran cuerpos ignimbríticos de 1.4 Ma que subyacen al conjunto de edificios volcánicos de la Sierra del Tzirate (Pérez-Orozco *et al.*, 2018). Predominan las pendientes fuertes a abruptas mayores de 15° a lo largo de la sierra y las laderas de los domos y menores a 10° sobre las laderas distales de la sierra, donde también se desarrollan algunos domos y conos. Predomina el patrón de drenaje dendrítico y subdendrítico medianamente desarrollado que fluye hacia las vertientes opuestas de la sierra.



Figura 36. Vista de los domos somitales de la Sierra del Tzirate. Fotografía tomada desde el occidente de la sierra.

9.2.1.10 Volcanes de La Providencia

Es un dominio formado por una concentración de conos cineríticos que se alinean con dirección NE-SO y se distinguen por presentar una morfología redondeada.

Cubre un área de 34 km² y muestra una orientación general NE-SO con una longitud de 8 km y un ancho de 4 km. Se encuentra en la porción suroeste de la región, al sur del dominio Mesa Volcánica de Rancho Seco y al norte del dominio Secuencia de Domos La Taza-La Nieve. Forma parte de los municipios de Lagunillas, Huiramba y Pátzcuaro. Al sureste del dominio se ubican las localidades de La Providencia y El Sauz.

Representa un relieve de mesa con colinas. Está conformado por 8 conos cineríticos con morfología redondeada y pendientes suavizadas que se agrupan en lineamientos volcánicos con dirección NE-SO. Es dislocado en su porción noreste por estructuras normales de tercer orden con dirección NE-SO. La altura máxima es de 2360 m en el cono La Providencia al noroeste de la localidad homónima y la mínima es de 2060 en la base de los conos El Cambio, al oeste del dominio. Las pendientes son fuertes >15° en las laderas proximales de los edificios volcánicos y moderadas a suaves <8° en sus laderas distales. El patrón de drenaje es radial centrífugo medianamente desarrollado en torno a los edificios volcánicos.

9.2.1.11 Volcanes escudo de Morelia

Se trata de un dominio caracterizado por un gran lineamiento morfoestructural con dirección NE-SO formado por las prominentes estructuras de los volcanes tipo escudo más grandes de la región: El Águila-Remolino y Quinceo-Tetillas.

Abarca un área de 356 km², con una orientación general NE-SO, un eje máximo con longitud de 30 km y ancho promedio de 12 km. Se localiza en la porción central de la RM, al sur del dominio Sucesión Volcánica de Cuitzeo, al este de los dominios Volcanes de Sanambo y Mesa Volcánica de Morelia y al oeste de los dominios Paleo-caldera de Atécuaro y Subcuenca Morelia-Charo. Cubre 298 km² del municipio de Morelia, que corresponden al 25%. Este dominio ha sido dividido en dos subdominios que agrupan a los dos edificios volcánicos principales y a los centros volcánicos de menor tamaño que los rodean.

a) Subdominio Quinceo-Tetillas

Es un dominio construido por dos volcanes de tipo escudo denominados Quinceo y Tetillas, los cuales rodean o subyacen a otros volcanes de mucho menor tamaño (Figura 37).

Tiene una superficie de 185 km² y presenta una orientación general NE-SO, una longitud de 17 km y un ancho promedio de 10 km. Se ubica en la parte central de la Región de Morelia, al sur del dominio Sucesión Volcánica de Cuitzeo, al noroeste de la ciudad de Morelia y al oeste del subdominio Planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón. Al sur y sureste del dominio alberga una porción de la ciudad de Morelia, al oeste se encuentra la localidad de Cuto de la Esperanza y al norte Chiquimitío. Al sureste se ubica parte del manantial La Mintzita y al sur grandes conjuntos habitacionales de Morelia como Villas del Pedregal y Villa Magna. Se encuentra mayormente en el municipio de Morelia y una pequeña porción pertenece al municipio de Tarímbaro. Del municipio de Morelia abarca 176 km², que corresponden al 15%.

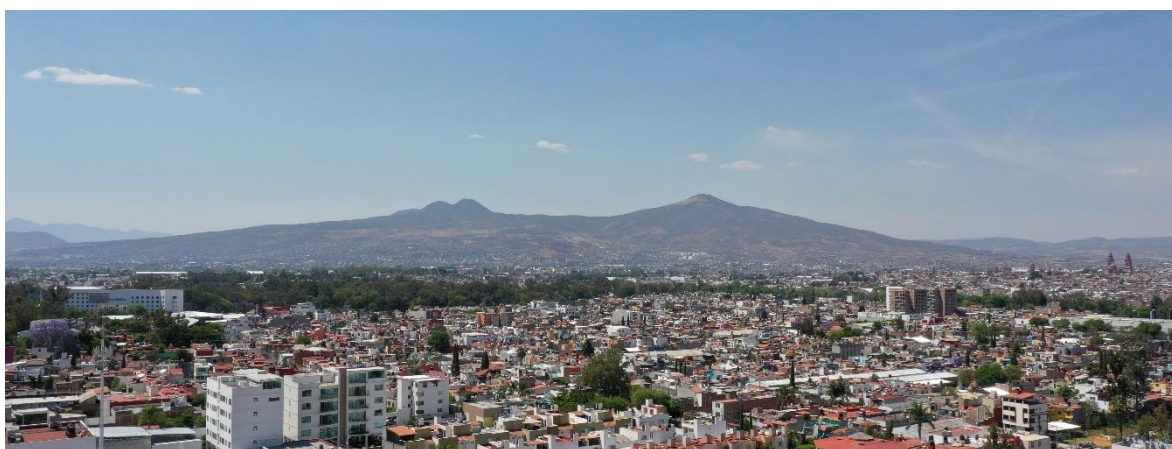


Figura 37. Panorámica tomada desde el sur de la ciudad de Morelia, con vista hacia el noroeste. Al fondo se observa la morfología tipo escudo de los volcanes Quinceo (a la derecha) y Tetillas (a la izquierda), caracterizados por presentar derrames de lava que forman laderas con pendientes suaves y extendidas. Estos volcanes delimitan el margen noroeste de la traza urbana de Morelia. En el extremo oeste (izquierda) se observa el perfil del C. Pelón, mientras en el margen derecho, en segundo plano se observan las mesas del dominio Sucesión Volcánica de Cuitzeo.

Predomina un relieve de montaña con colinas y también presentan una amplia mesa volcánica de poca altura inclinada hacia la ciudad de Morelia. El dominio está conformado por dos volcanes tipo escudo, 4 conos cineríticos, 4 domos y 1 *spatter*. Al suroeste del dominio se alinean, con dirección NE-SO, 3 conos y 1 *spatter* que incluyen a los conos Pelón, Jamanal y Cerritos. El dominio es dislocado por estructuras normales con dirección ENE-OSO a NE-SO. La altura máxima se sitúa en la cima de un domo que corona al volcán Tetillas a 2760 m

s.n.m. y la mínima es de 1880 m s.n.m. al noreste del dominio en donde colinda con la Planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón. En las laderas del volcán Tetillas predominan las pendientes moderadas a suaves $<10^\circ$. En las laderas del Quinceo las pendientes son generalmente fuertes $<25^\circ$ en alturas mayores a los 2200 m s.n.m. y moderadas a suaves $<10^\circ$ en alturas inferiores. Los conos y domos presentan laderas con pendientes fuertes mayores a 20° y la mesa de lavas generada por el spatter ubicado al sur del cerro Pelón presenta pendientes moderadas a suaves $<10^\circ$. Domina la red de drenaje de tipo radial centrífugo de los volcanes en escudo, con un mayor grado de disección sobre el Quinceo que en el Tetillas.

b) Subdominio El Águila - El Remolino

Es un dominio constituido por un edificio volcánico principal de tipo escudo denominado El Águila, el cual está rodeado por una serie de aparatos volcánicos de menores dimensiones.

Tiene una superficie de 171 km^2 con un contorno que tiende a ser circular y un diámetro promedio de aproximadamente 13 km. Se ubica en la porción centro-occidental del área de estudio, al norte del dominio Sucesión de Domos La Taza-La Nieve, al oeste del dominio Paleo-caldera de Atécuaro y al sur del dominio Mesa Volcánica de Morelia. Se ubica al suroeste de la ciudad de Morelia. En la parte sur del dominio se encuentran las localidades de Tiripetío y Lagunillas y en la parte norte están Tacícuaró, Capula y San Nicolás Obispo. Cubre 122 km^2 del municipio de Morelia, el 10% del municipio.

Representa un relieve de montaña. Está constituido por un edificio principal de tipo escudo, rodeado por 10 conos cineríticos y un volcán tipo escudo de menor tamaño llamado El Remolino. Se encuentra dislocado por fallas normales de segundo orden con dirección NE-SO y ENE-OSO, como las fallas Huiramba y Cointzio, al sur y este del dominio, respectivamente. La altura máxima es de 3060 m s.n.m. en la cima del Águila y la mínima es de 2020 en la base sureste del dominio. Las pendientes son fuertes, mayores a 20° en alturas mayores a los 2500 m s.n.m., y moderadas a suaves, menores a 10° en alturas inferiores. El patrón de drenaje dominante es de tipo radial centrífugo bien desarrollado.

9.2.1.12 Volcanes de Sanambo

Se trata de un dominio representado por un edificio volcánico principal de tipo escudo que alberga otros 5 centros eruptivos de menor tamaño.

El dominio Volcanes de Sanambo se localiza en la porción oeste de la Región de Morelia. Con respecto a los dominios de paisaje, se localiza al sureste del dominio Sierra del Tzirate, al oeste del subdominio El Águila-Remolino y al sur del dominio Mesa Volcánica de Morelia. Abarca un área de 82 km². Se encuentra dentro de los municipios de Morelia, Quiroga y Tzintzuntzan. Dentro del dominio se encuentran las localidades de Sanambo, Irtzio y parte de Capula. Del municipio de Morelia cubre 28 km², el 2%.

Presenta un relieve de montaña baja y extendida con conos cineríticos, spatters y dos volcanes tipo escudo. Contiene a un edificio volcánico principal de tipo escudo, aquí denominado Buenavista, con límites circulares que es subyacente por; 2 conos, Irauco y El Melón, siendo el Melón el cono cinerítico más representativo dada su morfología joven y bien preservada que fluye hacia la base de la localidad de Capula (Figura 38); un *spatter* denominado La Mesa El Gachupín y; un volcán tipo escudo de menor tamaño en comparación con Buenavista, llamado Sanambo. La altura máxima es de 2760 m s.n.m. en la cima del cono Irauco y la mínima es de 2100 m s.n.m. al norte de Capula.



Figura 38. A la derecha de la imagen sobresale la morfología cónica del volcán El Melón, sobre la base del volcán tipo escudo Buenavista. A la izquierda de la imagen se observa una parte del volcán Sanambo, también sobre la base del volcán Buenavista.

Predominan las pendientes suaves a moderadas menores a 10° en las laderas del edificio principal, pendientes moderadas a fuertes <25° en los flujos del Sanambo, pendientes fuertes <30° en los conos, y pendientes suaves <5° en los flujos del spatter La Mesa El Gachupín.

Predomina un patrón de drenaje radial centrífugo bien desarrollado en torno al edificio principal.

9.2.1.13 La Alberca

Es un dominio definido por una larga mesa de lavas caracterizada por la presencia de una depresión volcánica que se posiciona al centro y forma un pequeño lago llamado La Alberca, el cual debe su origen a una erupción freatomagmática (Figura 39).

Abarca un área de 19 km² y posee una forma alargada con una orientación general al NNO-SSE, con una longitud de 7 km y un ancho promedio de 2 km. Este dominio se encuentra en la parte occidental de la Región de Morelia, al este de la Sierra del Tzirate, al norte del dominio Mesa Volcánica de Morelia y al oeste del subdominio Picacho. Se encuentra entre los municipios de Huaniqueo y Morelia. En este dominio se ubican las localidades de La Alberca y Tecacho. Del municipio de Morelia abarca 11 km², que corresponde a un 1%.



Figura 39. Fotografía del maar la Alberca, denominada por diferentes autores como La Alberca de Guadalupe o La Alberca de Teremendo.

Se trata de un relieve de mesa alargada con un cono cinerítico y una pequeña depresión volcánica de cráter freatomagmático (*maar*). El dominio es dislocado por fallas normales con dirección ENE-OSO. Predominan las pendientes suaves <5° sobre la mesa, con pendientes fuertes a abruptas entre 20-45° en las paredes internas de La Alberca de Guadalupe y

pendientes fuertes <25 en las laderas proximales del cono El Pelón. Las redes de drenaje presentan un patrón subparalelo con afluentes menores siguiendo la dirección de las fallas que cortan al dominio y que se unen a afluentes mayores orientados paralelos (NNO-SSE) a la mesa alargada que define al dominio.

9.2.1.14 Conos de Tanimireche

Es un dominio conformado por conos y flujos de lava, alineados con dirección ENE-OSO.

Abarca un área de 32 km^2 , muestra una forma alargada con longitud de 12 km y orientación al ENE-OSO. Se localiza al norte de la Región Morelia, al norte del dominio Alberca de Guadalupe y al oeste del dominio Sucesión Volcánica de Cuitzeo. Es delimitado al sur por los segmentos de una estructura de primer orden con dirección NE-SO. Forma parte de los municipios de Chucándiro y Huaniqueo. Dentro se ubican las localidades de Tanimireche y El Salto.

Presenta un relieve de mesa de derrames de lava con conos y *spatters*. En total presenta 6 centros eruptivos, 3 conos y 3 *spatters*. El dominio es cortado por estructuras normales con dirección ENE-OSO, E-O y NO-SE. Predominan las pendientes suaves a moderadas $<10^\circ$ sobre las mesas de lavas, con pendientes entre $10-25^\circ$ en los conos. La elevación máxima es de 2430 m s.n.m. en la cima del cono Cerro Pelón y la mínima es de 1850 m en la base del cono La Batea en el extremo nororiental del dominio. El drenaje es radial centrífugo bien desarrollado en el Cerro Pelón y poco desarrollado en el resto del dominio.

9.2.1.15 Mesa volcánica de Rancho Seco

Es un dominio formado por conos cineríticos y derrames de lava alineados con dirección NO-SE.

Este dominio se extiende en un área de 53 km^2 , con orientación general alargada al NO-SE, longitud de aproximadamente 10 km y ancho promedio de 5 km. Se encuentra en la porción oeste de la Región de Morelia, colinda al sur con el dominio Volcanes de La Providencia, al norte con el dominio Volcanes de Sanambo y al oeste con el dominio Volcanes de Pátzcuaro-Tzintzuntzan. Forma parte de los municipios de Tzintzuntzan y Quiroga. Contiene a las localidades de Atzimbo y Coenembo.

Corresponde a un relieve volcánico de extensas mesas con colinas. Está conformado por 6 conos cineríticos que tienden a alinearse con dirección NO-SE, los conos más representativos son Rancho Seco, El Olvido y Atzimbo. Destaca la morfología joven de los flujos anastomosados del volcán Rancho Seco. La altura máxima se ubica en la cima del volcán Rancho Seco, a 2520 m s.n.m., la mínima es de 2060 m s.n.m. al oeste del dominio. Los flujos de lava presentan espesores de 20 a 80 m. Las pendientes son suaves $<4^{\circ}$ sobre las mesas de lavas, con frentes de lava con pendientes fuertes mayores a 15° . Las laderas de los edificios volcánicos muestran pendientes fuertes mayores a 25° y menores a 45° . Las redes de drenaje están poco desarrolladas.

Cabe mencionar que las mesas de lava de Rancho Seco cimentan la base del sitio arqueológico de Angamuco.

9.2.1.16 Mesa volcánica de Morelia

Se trata de un dominio conformado por numerosos pequeños edificios volcánicos y sus flujos de lavas. De manera general se caracteriza por presentar una clara morfología volcánica joven.

Abarca un área de 146 km^2 con una forma irregular modelada por los flujos de lava que se extienden hacia diferentes direcciones, como los flujos de los conos La Mina, Los Caballos, Zajo Grande y El Reparó. Se ubica en la porción oeste de la región, al este de la Sierra del Tzirate, al oeste del Subdominio Quinceo-Tetillas y al sur del dominio Alberca de Guadalupe. Dentro del dominio se ubican las localidades de San Bernabé y Teremendo Jasso. Se encuentra dentro de los límites occidentales del municipio de Morelia, con una muy pequeña porción de los municipios de Quiroga y Chucándiro. Del municipio de Morelia cubre 135 km^2 , que corresponden al 11% de su superficie.

Está representado por amplias mesas de lavas con conos cineríticos y *spatters*. En total se identifican 22 centros eruptivos, aunque se estima que hay más que han sido sepultados ya que no se localizan los centros de algunos flujos, 15 son clasificados como conos cineríticos y 7 *spatters*. Algunos volcanes representativos son La Mina, Coro Grande, El Molcajete y El Malacate. La cota máxima se encuentra en la cima del volcán doble llamado La Alberquilla a 2980 m s.n.m. en la base este de la Sierra del Tzirate y la mínima es de 2130 m s.n.m. en el límite este del dominio, junto al subdominio Quinceo-Tetillas. Predominan las pendientes

suaves menores a 5° en las mesetas de lava mientras las laderas de los edificios volcánicos tienen pendientes de entre 35-25°. Las redes de drenaje se muestran muy poco desarrolladas.

9.2.1.17 Volcanes de Pátzcuaro-Tzintzuntzan

Es un dominio conformado por una concentración de diferentes geoformas volcánicas con morfologías relativamente jóvenes (Pleistoceno-Holoceno) que incluye volcanes en escudo de tamaño mediano, domos y conos.

Tiene una superficie de 127.3 km² y se ubica en el límite suroeste de la Región de Morelia, en los límites este de los municipios de Pátzcuaro y Tzintzuntzan y al este del lago de Pátzcuaro. Al oeste colinda con el dominio Sucesión de Domos La Taza-La Nieve y al noroeste con el dominio Mesa Volcánica de Rancho Seco. Contiene las localidades de Cuanajo, Buenavista, Santa Cruz, entre otras pequeñas poblaciones.

Presenta una topografía de montañas medias, colinas y mesetas de lava. Muestra 17 centros eruptivos que incluyen 8 conos, 7 domos, destacando los domos de la Muela y El Huracán, y dos volcanes tipos escudo, Frijol y Yahuarato. Cabe mencionar que al norte del dominio se encuentran separados los volcanes Yarahuato, El Huracán y otros dos conos que en conjunto con el volcán Tariaqueri, más al oeste del área de estudio forman una lineación morfoestructural con orientación E-O que dan origen a la particular forma de “C” del Lago de Pátzcuaro al encontrarse entre dos pequeñas planicies que drenan sus corrientes superficiales hacia el lago.

La altura máxima se encuentra en la cima del volcán El Frijol a 3100 m s.n.m. y la más baja se ubica en la base del Yarahuato a 2040 m s.n.m. Los valores de las pendientes son variables debido a las diferentes geoformas volcánicas, en los domos las pendientes son fuertes a abruptas >20°; en el caso de los volcanes en escudo, el Yahuarato tiene laderas con pendientes moderadas <15° mientras en los flujos jóvenes de las laderas del Frijol se muestran pendientes fuertes de hasta 35°. Por otra parte, los conos presentan laderas con pendientes entre 15-30° y mesetas de lava con pendientes suaves <5°. Predomina un patrón de drenaje radial centrífugo que rodea a los edificios volcánicos.

9.2.1.18 Planicies de la Región de Morelia

Se trata de un grupo de zonas planas con poca inclinación y de diferentes dimensiones, delimitadas por volcanes y lineamientos morfoestructurales con dirección ENE a NE.

La Región de Morelia presenta 4 zonas de planicies que se distribuyen al sur, noreste, noroeste y oeste de la región. Son representadas por los subdominios: a) Planicie Tiripetío-Santiago Undameo, b) Planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón, c) Planicie de Zacapu y d) Planicies del Lago de Pátzcuaro. A continuación, se describe cada una de ellas.

a) Subdominio Planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón

La Planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón representa la planicie más grande y baja de la región a una altura de entre 1840-1880 m s.n.m.

Abarca un área de 114 km² y muestra una forma alargada con orientación general ENE-OSO, una longitud de 20 km (aunque se extiende más allá del área de estudio) y un ancho máximo de 8 km que disminuye de este a oeste hasta 1.5 km. Se encuentra en la porción noreste de la Región de Morelia, al sur del dominio Secuencia Volcánica de Cuitzeo, al norte del dominio Subcuenca Morelia-Charo y al este del subdominio Quinceo-Tetillas. Es delimitada al sur por una estructura normal de primer orden asociada al Sistema de Fallas Morelia-Acambay llamada falla Tarímbaro-Álvaro Obregón que delimita también al dominio Subcuenca Morelia-Charo (Figura 40). Se encuentra dentro de los municipios de Tarímbaro y Álvaro Obregón. Algunas localidades representativas son Tarímbaro, Téjaro de los Izquierdo, Álvaro Obregón y Palo Blanco. Esta planicie es atravesada por importantes ríos como el río Viejo de Morelia, Joconol, Higuierillas y San Marcos. Además, dentro del subdominio se localiza el aeropuerto internacional General Francisco J. Mujica.

Representa una planicie con aisladas lomas bajas. Se identifican 3 lomas bajas aisladas en la porción este del subdominio, sobre las cuales se sitúan las localidades de Téjaro de los Izquierdo, Álvaro Obregón y Palo Blanco. La altura mínima es de 1840 m s.n.m. y aumenta paulatinamente hasta alcanzar los 1880 m s.n.m. hacia el extremo oeste del subdominio. Predomina una pendiente plana menor a 1°. En el área predomina un patrón de drenaje subparalelo ENE-OSO a NE-SO donde afluentes menores de corrientes superficiales provenientes del dominio Secuencia Volcánica de Cuitzeo, al norte, y del dominio Subcuenca

Morelia-Charo, al sur, se unen principalmente a los ríos canalizados El Joconol, Rio Viejo de Morelia y San Marcos.

b) Subdominio Planicie de Zacapu

Es una planicie con ligeras elevaciones que se extiende desde la ciudad de Zacapu hasta el límite noroeste de la Región de Morelia, a una altura de entre 2000 y 2050 m s.n.m.



Figura 40. Fotografía tomada desde la ladera sureste del Quinceo. Al fondo a la izquierda se extiende la planicie Tarímbaro – Álvaro Obregón, a la derecha el dominio Subcuenca Morelia – Charo. En el centro de la imagen se observan los lineamientos de fallas geológicas, con escarpes no mayores a ≈ 200 m, que delimitan el bajo estructural, representado por la planicie Tarímbaro – Álvaro Obregón.

Abarca un área de 37 km^2 y presenta una forma irregular con límites angulosos. Se ubica en el límite noroccidental de la RM, limitada al norte por el dominio Flujos de La Leonera-Tendeparacua y al sur por los dominios Sierra del Tzirate y La Alberca de Guadalupe. Su forma irregular y angulosa se debe a que es delimitada por altos estructurales alargados con dirección ENE-OSO que se extienden hacia la planicie. Se encuentra dentro de los municipios de Huaniqueo y Coeneo y contiene a la localidad de Jesús María, entre otras pequeñas localidades. Por la zona pasan los ríos La Patera y San Francisco.

Es una planicie con lomas bajas. La altura máxima es de 2050 m s.n.m. al noroeste del subdominio, cerca de Jesús María, y la mínima es de 2000 m s.n.m. la cual se mantiene en la mayor parte del subdominio. Predomina una pendiente plana a ligeramente suave menor a 2°

y en las lomas las pendientes son suaves $<8^\circ$. Las redes de drenaje muestran un patrón subparalelo en donde afluentes menores que descienden de las partes altas de los dominios Flujos de La Leonera-Tendeparacua y Sierra del Tzirate se unen a los ríos canalizados principales.

c) Subdominio Planicie Tiripetío-Santiago Undameo

Es una planicie a 2020 m s.n.m. caracterizada por presentar una orientación NE-SO.

Abarca un área de 38 km² con una forma alargada con orientación NE-SO, tiene una longitud de 10 km y un ancho promedio de 2 km. Se encuentra en la parte centro-sur de la RM, al sureste del subdominio El Águila-Remolino, al suroeste del dominio Caldera de Atécuaro y al norte del volcán La Trampa. Se ubica dentro de los municipios de Morelia, Acuitzio y una muy pequeña parte del municipio de Lagunillas. En el extremo noreste del subdominio se sitúa la localidad de Santiago Undameo y al suroeste se ubica Tiripetío. Por la zona pasan los ríos Tupátaro, El Tornillo, El Mezquite y río Grande, que descienden de la Presa de Cointzio, al noreste del subdominio. Abarca 27 km² del municipio de Morelia, el 2%.

Es una planicie intermontana. Todo el subdominio se mantiene a una altura de 2020 m s.n.m. con pendientes planas menores a 1° . La red de drenaje es subparalela, donde afluentes menores que provienen de las redes de drenaje centrífugas del volcán El Águila, La Trampa y volcanes del dominio Sucesión de Domos La Taza-La Nieve fluyen hacia los ríos canalizados de la planicie.

d) Subdominio Planicies del Lago de Pátzcuaro

Se trata de dos planicies, divididas por el lineamiento morfoestructural E-O de los volcanes en escudo Tariaqueri y Yahuarato, que se conectan con el lago de Pátzcuaro más al oeste del área de estudio.

Abarcan un área total de 25 km² con orientaciones E-O y límites redondeados. Se ubican en el límite oeste central de la RM, al sur del dominio Sierra del Tzirate y al oeste del dominio Mesa Volcánica de Rancho Seco. Se encuentran dentro de los municipios de Quiroga, Tzintzuntzan y Pátzcuaro y contienen a las localidades de Nuevo Rodeo y Quiroga.

Se trata de dos planicies costeras del Lago de Pátzcuaro. Estas dos planicies interrumpidas por los volcanes Tariaqueri y el Yahuarato le dan la particular forma de “C” al Lago de

Pátzcuaro. Ambas planicies son muy similares, presenta una altura máxima de 2060 m s.n.m. en el límite este que disminuye al oeste hasta 2040 m s.n.m., con pendientes planas a ligeramente suaves menores a 3° inclinadas al oeste.

9.2.2 Sistemas de lineamientos morfoestructurales

En la Región de Morelia se han identificado 4 sistemas de lineamientos morfoestructurales: 1) Sistema Caldérico E-O, 2) Sistema NO-SE, 3) Sistema NE-SO Mil Cumbres y 4) Sistema E-O Morelia-Acambay. A continuación, se describe cada uno, incluyendo su definición, distribución espacial y se concluye con las relaciones temporales.

9.2.2.1 Sistema caldérico E-O

Es un sistema representado por un gran lineamiento morfoestructural con dirección E-O conformado por la relativa continuidad de dos estructuras semi-circulares de origen volcánico-tectónico que corresponden a las paleo-calderas de Atécuaro y La Escalera.

Este sistema se observa esencialmente en la porción sureste de la Región de Morelia. Está asociado a paleo-estructuras y sucesiones volcánicas que han conformado los dominios más antiguos de la región. Al trazar un eje lineal que une ambos sistemas de calderas, se observa una longitud máxima con orientación E-O de 25 km, con un ancho promedio de 10 km, por lo que el lineamiento cubre un área aproximada de 250 km². Este sistema es dislocado por tres sistemas de lineamientos morfoestructurales con direcciones NO-SE, NE-SO y E-O. Cabe resaltar que el grupo de lineamientos con dirección NO-SE se aprecia claramente en el dominio Sierra y Paleo-caldera La Escalera, mientras que, en el dominio Paleo-caldera de Atécuaro este grupo es más reducido e inferido. Este gran lineamiento morfoestructural se encuentra delimitado y dislocado al norte por una serie de estructuras de primer orden con cinemática extensional y dirección E-O del Sistema de Fallas Morelia-Acambay. También es cortado diagonalmente (separando a las paleo-calderas), por el escarpe fragmentado de un gran lineamiento de primer orden de un sistema de fallas reciente con dirección NE-SO, que se extiende a lo largo de 30 km. El sistema se asocia a una topografía con un alto grado de fracturamiento y erosión.

9.2.2.2 Sistema NO-SE

Es un sistema de lineamientos morfoestructurales con orientación NO-SE caracterizado por dislocar a las unidades geológicas más antiguas de la región, con direcciones que van de N290° a N335°.

Este sistema puede apreciarse en la porción sureste, norte y oeste de la región. Se puede observar de manera clara y abundante en los dominios Sierra y Paleo-caldera La Escalera, Paleo-caldera de Atécuaro y Sucesión Volcánica de Cuitzeo, y de manera más discreta en los dominios Sierra del Tzirate y Mesa Volcánica de Rancho Seco.

En los dominios Sierra y Paleo-caldera La Escalera, Paleo-caldera de Atécuaro y Sucesión Volcánica de Cuitzeo, el sistema es representado por lineamientos estructurales inferidos que delimitan altos y bajos estructurales con escarpes de falla erosionados y controlando afluentes principales de las bien desarrolladas redes de drenaje, con lineamientos que van de 2 a 7 km. Dos lineamientos representativos del sistema en esta zona son representados por el curso del río Chiquito en la porción que se dirige de San José de Las Torres hacia la ciudad de Morelia, con orientación N296° y longitud aproximada de 4 km, con su límite en el escarpe de la falla Morelia, donde es cortado por esta estructura con orientación E-O. El segundo lineamiento representativo se observa delimitando el margen sur del lago de Cuitzeo con una longitud de 4 km, que junto a otra estructura (que la corta) con dirección NE-SO crean una estructura en forma de tijera que demarca el margen costero del lago.

Por otra parte, en los dominios Sierra del Tzirate y mesa volcánica de Rancho Seco este sistema se presenta con la alineación de centros eruptivos y algunas fallas inferidas. En la Sierra del Tzirate se encuentran alineados tres domos, C. Azul, C. Chino y El Tzirate, con dirección N326° en un eje de 8 km. En el dominio Mesa Volcánica de Rancho Seco se observa una alineación de 6 conos con orientación N312°, estos corresponden a los conos de Rancho Seco, El Olvido y Atzimbo. También se infieren estructuras con dirección N335° y longitudes de 2 a 4 km delimitando al subdominio La Trampa-Zirapio.

El sistema NO-SE, por relaciones de corte, es más viejo que los sistemas NE-SO y E-O.

9.2.2.3 Sistema NE-SO Mil Cumbres

Se trata de un sistema de lineamientos morfoestructurales con dirección NE-SO que se distribuyen en casi toda el área de estudio, con la alineación de centros eruptivos y estructuras de fallas con orientación N35° a N60°.

Es un sistema que se distribuye ampliamente en la región. Se muestra en los dominios sierra y Paleo-caldera La Escalera, Paleo-caldera de Atécuaro, Sucesión Volcánica de Cuitzeo, Subcuenca Morelia-Charo, Flujos de La Leonera-Tendeparacua, Secuencia de Domos La Taza-La Nieve, Sierra del Tzirate, Volcanes Escudo de Morelia, Mesa Volcánica de Morelia y en el subdominio Planicie Tiripetío-Santiago Undameo.

Este sistema es representado por volcanes alineados de pequeñas y grandes dimensiones, estructuras de fallas de primero, segundo y tercer orden, e importantes planicies. Dividiendo a los antiguos dominios Sierra y Paleo-caldera La Escalera y Paleo-caldera de Atécuaro se encuentra una de las estructuras más representativas de este sistema, un lineamiento regional con desniveles de hasta 500 m, con dirección N40° y aproximadamente 30 km de longitud que configura la línea divisoria entre las regiones hidrográficas Lerma-Santiago al noroeste (bloque alto) y Balsas al sureste (bloque bajo). A lo largo de este megalineamiento se desarrollan otras estructuras con orientación N20° a N30° y longitud máxima de 3 km que podrían ser asociadas a un sistema conjugado lateral izquierdo. A una distancia de 15 km al noroeste de esta megaestructura se desarrolla en forma paralela otro importante lineamiento morfoestructural con dirección N40° y aproximadamente 30 km de longitud, se trata del dominio Volcanes Escudo de Morelia, que condicionó el emplazamiento de los volcanes en escudo El Águila-El Remolino y Quinceo-Tetillas y a los conos cineríticos Cerro Pelón, Cerritos, Jamanal y a un *spatter*. Otros lineamientos morfoestructurales importantes corresponden al subdominio Planicie Tiripetío-Santiago Undameo, una planicie estrecha con una orientación alargada al NE-SO de 10 km, y al dominio Morelia, que presenta una planicie también alargada al NE-SO con una longitud aproximada de 11 km. Pequeños centros eruptivos con morfología de conos y domos están alineados en dirección NE-SO en grupos de 3 a 5 centros. Esto último en los dominios Volcanes de La Providencia y Mesa Volcánica de Morelia, en la porción norte del dominio Sierra del Tzirate y en el subdominio La Trampa-Zirapio. Por último, cabe destacar que fallas de segundo a tercer orden con esta orientación

cortan a los dominios Sierra y Paleo-caldera La Escalera, Paleo-caldera de Atécuaro, Sucesión Volcánica de Cuitzeo, Morelia, Subcuenca Morelia-Charo, Flujos de La Leonera-Tendeparacua, Secuencia de Domos La Taza-La Nieve, Volcanes Escudo de Morelia y Volcanes de La Providencia.

Este sistema morfoestructural corta al sistema NO-SE y es cortado por el sistema E-O Morelia-Acambay, esto último puede observarse en la relación de corte de los flujos Pliocénicos de La Leonera, al noroeste de la región.

9.2.2.4 Sistema E-O Morelia-Acambay

Es un sistema de lineamientos morfoestructurales con dirección E-O a ENE-OSO, representado principalmente por fallas con desplazamiento normal y distinguido por ser el sistema más joven, con orientaciones de N65° a N90°.

Se distribuye en la porción norte y este de la Región de Morelia, en los dominios morfoestructurales Sierra y Paleo-caldera La Escalera, Paleo-caldera de Atécuaro, Sucesión Volcánica de Cuitzeo, Subcuenca Morelia-Charo, Flujos de La Leonera-Tendeparacua, Picacho-La Trampa, Sierra del Tzirate, Volcanes Escudo de Morelia, La Alberca y Conos de Tanimireche. Este sistema es poco visible en la porción suroeste de la Región de Morelia.

Se trata de un sistema representado principalmente por estructuras de deformación frágil con desplazamiento normal de primero a tercer orden. Se puede apreciar como al oeste de la región, en los dominios Sierra y Paleo-caldera La Escalera, Paleo-caldera de Atécuaro y Subcuenca Morelia-Charo este sistema tiende más a una orientación E-O, mientras que, en el resto de los dominios tiende a orientarse más al ENE-OSO. En la porción oriental del área de estudio se presentan lineamientos de primer orden representados por la falla Morelia (también denominada La Paloma) y Tarímbaro-Álvaro Obregón, con desplazamiento normal y direcciones E-O y ENE-OSO, respectivamente, echado al norte y escarpes de falla con aproximadamente 200 m de desnivel. Estas estructuras de primer orden se encuentran delimitando a un bloque con orientación E-O y longitud de más de 20 km que corresponde al dominio Subcuenca Morelia-Charo. Por otra parte, el sistema disloca a las unidades geológicas de los dominios Sierra del Tzirate, Flujos de La Leonera-Tendeparacua, La Alberca, Volcanes Escudo de Morelia, Conos de Tanimireche, y al subdominio Picacho, con estructuras del orden de 15 a 2 km. El dominio Conos de Tanimireche, al noroeste de la

Región de Morelia, se presenta como un dominio alargado con orientación ENE-OSO con centros eruptivos alineados que muestran un claro paralelismo con las estructuras de fallamiento normal que forman este sistema.

El sistema E-O es un sistema regional ampliamente estudiado denominado Sistema de Fallas Morelia-Acambay (Suter *et al.*, 1992, 1995, 2001; Suter, 2016; Garduño-Monroy *et al.*, 2009). Se trata del sistema de lineamientos morfoestructurales más joven, ya que dentro de la región corta a los sistemas: Sistema Caldérico E-O, Sistema NO-SE y Sistema NE-SO. A la escala de estudio de este trabajo, la estructura volcánica más joven (con fechamiento) con una morfología claramente cortada por este sistema corresponde al cono El Molcajete, al sureste de la localidad de Zipiajo, el cual presenta una edad de 14,710 a (Kshirsagar *et al.*, 2015).

Resultados 9.3 Cartografía y unidades geológicas de la Región de Morelia

En este subcapítulo se presenta la clasificación de unidades geológicas, sus descripciones y sucesivamente los sistemas tectónicos que han afectado a la región. También se presenta la carta geológica, elaborada a partir del análisis de geoformas volcánicas, morfoestructural y geológico, la revisión y recopilación de material bibliográfico y la verificación en campo.

9.3.1 Unidades geológicas

En este apartado se describen 20 unidades geológicas de la Región de Morelia y sus correspondientes subunidades, las cuales son de origen mayormente volcánico. Para cada unidad se describe su distribución, litología, temporalidad y estructura, además de algunas consideraciones particulares. En un apartado posterior se describen y sintetizan los sistemas estructurales que han sido identificados en la región, los cuales son esencialmente generados por procesos tectónicos de deformación frágil. También se presenta la carta geológica de la región, la cual muestra la distribución espacial de sus unidades y de las estructuras tectónicas regionales (Figura 41). Esta carta ha sido realizada a una escala de trabajo de 1:50, 000 y aquí se presenta a una escala adecuada al formato de impresión para este documento.

9.3.1.1 Sucesión volcánica Tafetán-Mil Cumbres

La Sucesión volcánica Tafetán-Mil Cumbres corresponde a la unidad geológica más antigua de la región, se expone a lo largo de todo el sector oriental con una orientación prevalente NNO-SSE. Ha sido subdividida en tres subunidades volcánicas del Mioceno (con algunas edades del Oligoceno), que se denominan: a) sucesión Tafetán (Oligoceno-Mioceno), b) domos y derrames Mil Cumbres (Mioceno Inferior) y c) derrames de lava Cuitzeo (Mioceno inferior). A continuación, se describen individualmente.

a) Sucesión Tafetán

La subunidad geológica inferior de la Región de Morelia corresponde a la Sucesión Tafetán. Esta es una subunidad volcánica del Oligoceno-Mioceno que se distribuye en la porción

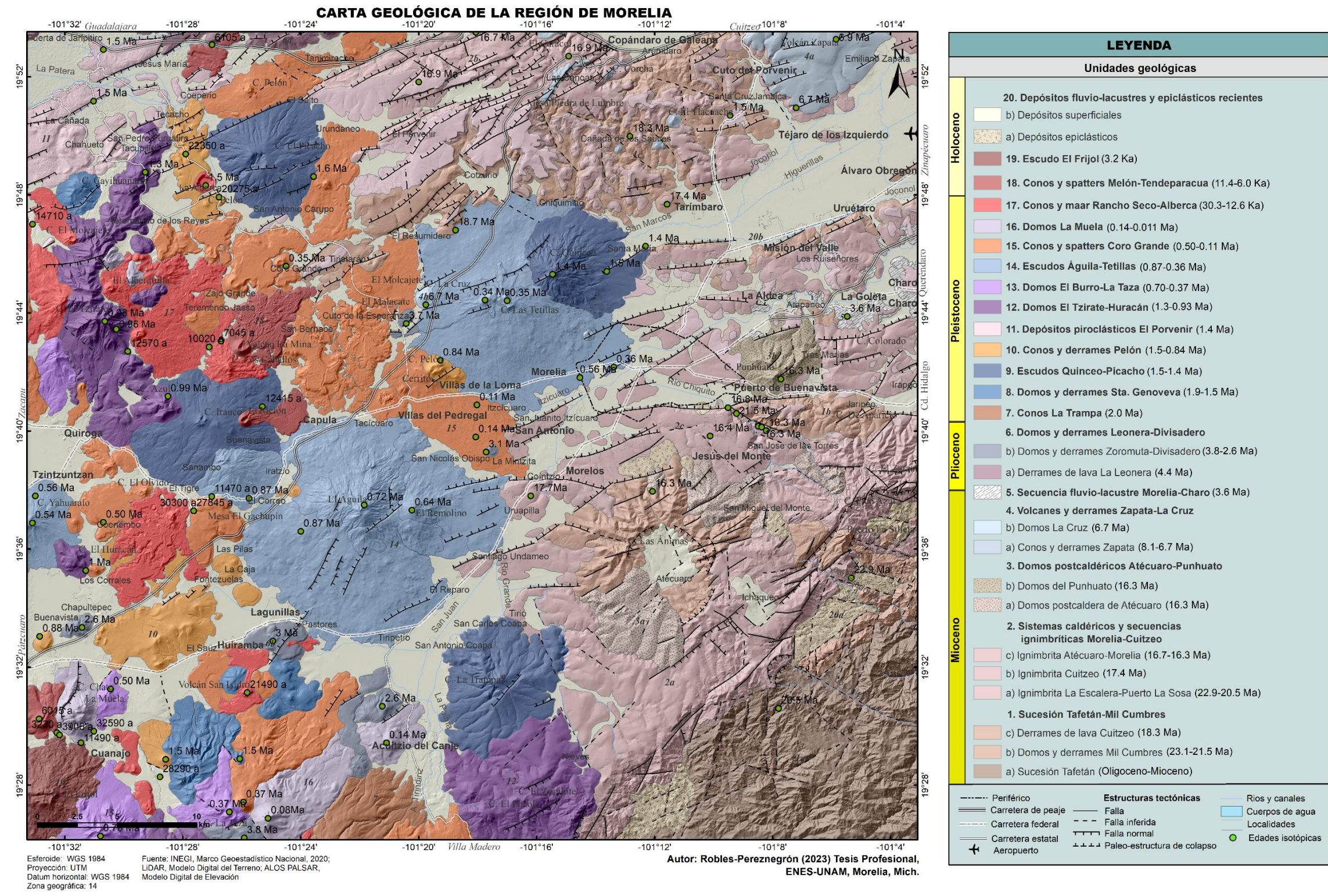


Figura 41. Carta geológica de la Región de Morelia. En el mapa y la leyenda se presentan las edades isotópicas con cifras redondeadas para para facilitar la lectura. La lista completa de edades con coordenadas, rango de error, métodos de datación y fuentes se incluyen en los anexos.

sureste de la región. Se trata de la subunidad más antigua, distribuida en un amplio paisaje de sierra caracterizado por un alto grado de erosión, fracturamiento y un intenso drenaje dendrítico que fluye a la red hidrográfica del Balsas.

Está compuesta por una sucesión de flujos de lavas, rocas epiclásticas e ignimbritas, con flujos de lava de composición predominantemente andesítica (Pasquarè *et al.*, 1991). En cuanto a sus relaciones estratigráficas, ésta sobreyace con ligera disconformidad a las rocas molásicas de la Formación Tzitzio (Pasquarè *et al.* 1991) y subyace a las unidades miocénicas de domos, derrames de lava e ignimbritas de la Sierra de Mil Cumbres (Pasquarè *et al.*, 1991; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Se reportan edades del Oligoceno de 33.44 ± 1.7 Ma para la Ignimbrita Mesa de Tzitzio, subunidad de ignimbrita inferior dentro de la sucesión Tafetán según Pasquarè *et al.* (1991), y de 30 ± 0.6 Ma para un dique gabroico que corta a la sucesión (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015), ambos fechamientos reconocidos fuera del área de estudio. En cuanto a su estructura, la morfología altamente dislocada de esta unidad es controlada por estructuras de primero y segundo orden con direcciones NO-SE a ONO-ESE y NE-SO.

Es oportuno mencionar que Pasquarè *et al.* (1991), en su definición de la sucesión Tafetán, la habrían dividido en tres subunidades de ignimbrita, sin embargo, la cartografía y descripción de estas unidades, hasta el momento no han sido bien delimitadas y se prefiere restringir a la formación Tafetán como la unidad más antigua del Oligoceno. Por lo tanto, en este trabajo las dos unidades de ignimbrita que sobreyacen a las unidades del Oligoceno y han sido integradas a la unidad geológica sistemas caldéricos y secuencias ignimbríticas Morelia-Cuitzeo. También se debe resaltar que la información geológica y cartográfica referente a la sucesión Tafetán es generalizada y se requiere un estudio más detallado para su caracterización.

b) Domos y derrames andesítico-dacíticos Mil Cumbres (Angangué)

Domos y derrames andesíticos-dacíticos Mil Cumbres es una subunidad volcánica del Mioceno Inferior conformada por domos y derrames de lava de composición prevalentemente andesítica y algunos domos dacíticos, los cuales se exponen intensamente erosionados y muy fracturados.

En la zona de estudio se observan distribuidos en la porción sureste y este de la Región de Morelia, sin embargo, afloran a lo largo de la Sierra de Mil Cumbres e incluso en la región de Angangueo (Figura 42; Pasquarè *et al.*, 1991; Corona-Chávez *et al.*, 1999; Hernández-Bernal *et al.*, 2018).



Figura 42. Afloramientos de los derrames de lava de la Sierra de Mil Cumbres en ciudad Tres Marías, al oriente de la ciudad de Morelia. Las líneas blancas indican la altura del afloramiento. a) Contacto concordante entre derrames de lava y estratos arcillosos de la secuencia lacustres de la subcuenca Morelia-Charo, la línea roja delimita el contacto aproximado. b) Afloramiento de derrames de lava, fracturados y con mineralización secundaria por alteración hidrotermal, en la base de un fraccionamiento al sur de Atapaneo.

Las estructuras remanentes de domos de lava se concentran al norte y sur de la estructura fragmentada de la paleo-caldera de colapso La Escalera, bordeando a la paleo-caldera de Atécuaro y en la base de las secuencias fluvio-lacustres de la subcuenca Morelia-Charo, al este de la ciudad de Morelia (Israde-Alcántara, 1995; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Se trata de derrames de lava de composición andesítica, con estructura masiva muy fracturada y alterada. En campo, al sureste de Atapaneo se pueden observar derrames de lava andesíticos muy fracturados y con alteración hidrotermal. En cuanto a sus relaciones

estratigráficas, sobreyace a la Sucesión Tafetán y en diferentes sectores al este de la ciudad de Morelia es cubierta por depósitos de ignimbrita, derrames de lava del C. Punhuato y secuencias fluvio-lacustres. Se han reportado edades de 23.1 ± 3.5 y 21.5 ± 0.1 Ma (Esquivias *et al.*, 2010; Arce *et al.*, 2012; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). De manera regional, esta unidad se muestra dislocada por estructuras de primero y segundo orden con orientación NO-SE, NE-SO y E-O.

c) Derrames de lava Cuitzeo

Derrames de lava Cuitzeo es una subunidad conformada por amplios derrames de lava del Mioceno Inferior altamente fracturados que se extienden en la parte norte y noreste de la Región de Morelia. Se trata de flujos de lava con composición de andesita-basáltica (Trujillo-Hernández *et al.*, 2022). De acuerdo con Avellán *et al.* (2020), son rocas del Mioceno Inferior con edades de 18.689 ± 0.281 Ma y 18.318 ± 0.149 Ma. Estratigráficamente, subyace a la unidad de ignimbrita Cuitzeo y a los depósitos piroclásticos El Porvenir (se describen más adelante), como se puede observar en el transecto de San Pedro Chicácuaro a El Porvenir, al norte de la región. Esta unidad es dislocada por estructuras con dirección NO-SE, NE-SO y ENE-OSO.

9.3.1.2 Sistemas caldéricos y secuencias ignimbríticas Morelia-Cuitzeo

Sistemas caldéricos y secuencias ignimbríticas Morelia-Cuitzeo representa una unidad de ignimbritas ampliamente distribuida en la porción oriental y al norte de la región con una orientación prevalente NNO-SSE. Se extiende desde el sureste de Morelia hasta el margen sur del lago de Cuitzeo. Está compuesta por grandes unidades de flujos piroclásticos del Mioceno Inferior (Pasquarè *et al.*, 1991; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015; Trujillo-Hernández *et al.*, 2022), geomorfológicamente representada por extensas mesas erosionadas, dislocadas y ligeramente basculadas que sobreyacen a la unidad Sucesión volcánica Tafetán-Mil Cumbres. La unidad está dividida en tres subunidades que se describen a continuación, estas son: a) ignimbrita La Escalera-Puerto La Sosa, b) ignimbrita Cuitzeo y c) ignimbrita Atécuaro-Morelia.

a) Ignimbrita La Escalera-Puerto La Sosa

Esta es una subunidad de ignimbritas del Mioceno que se distribuye en la porción sureste de la región. Geomorfológicamente, se caracteriza por conformar grandes mesas escarpadas,

dislocadas y erosionadas. Está compuesta por los productos piroclásticos provenientes de las calderas de colapso, La Escalera y Puerto La Sosa, la ubicación de esta última paleo-caldera se propone en este trabajo. Estos flujos presentan una composición riolítica (Pasquarè *et al.*, 1991; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Con respecto a su temporalidad, esta subunidad es relativamente contemporánea a la subunidad de domos y derrames Sierra de Mil Cumbres y precede al evento de colapso de la caldera de Atécuaro. Las edades reportadas son de 22.89 ± 0.30 Ma para la ignimbrita de La Escalera (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015) y de 20.53 ± 1 Ma para Puerto La Sosa (Pasquarè *et al.*, 1991). En cuanto a su estructura, esta subunidad es afectada por estructuras de deformación frágil con orientación NO-SE a ONO-ESE, NE-SO y E-O de primero y segundo orden.

Se debe resaltar que, debido a la información generalizada que se tiene de la distribución espacial de los productos de los eventos de colapso de las calderas La Escalera y Puerto La Sosa, es que se integran ambas en esta subunidad general. Se requieren estudios más detallados para su caracterización.

b) Ignimbrita Cuitzeo

Es una subunidad de ignimbritas del Mioceno que se distribuye en el sector norte y noreste de la región. Este evento ignimbrítico de fuente desconocida (Trujillo-Hernández, 2017) se encuentra sobreyaciendo a los derrames de lava Cuitzeo y subyaciendo a los derrames de lava del Volcán Zapata y los depósitos piroclásticos El Porvenir. Se le atribuye una edad de 17.424 ± 0.012 Ma (Avellán *et al.*, 2020). Esta subunidad es afectada por estructuras con dirección NO-SE y ENE-OSO y se muestra basculada al sureste. Las estructuras ENE-OSO la dislocan con particular intensidad (Figura 43).

c) Ignimbrita Atécuaro-Morelia

Es una subunidad de ignimbritas del Mioceno que se distribuyen al sureste y este de la región. Está conformada por ignimbritas de composición riolítica que provienen de la caldera de Atécuaro (Figura 44; Garduño-Monroy *et al.*, 1999a; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2004; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). En Morelia y al este de Morelia esta subunidad está cubierta por los derrames de lava del domo del C. Punhuato, los depósitos fluvio-lacustres de la subcuenca Morelia-Charo y los depósitos piroclásticos El Porvenir.

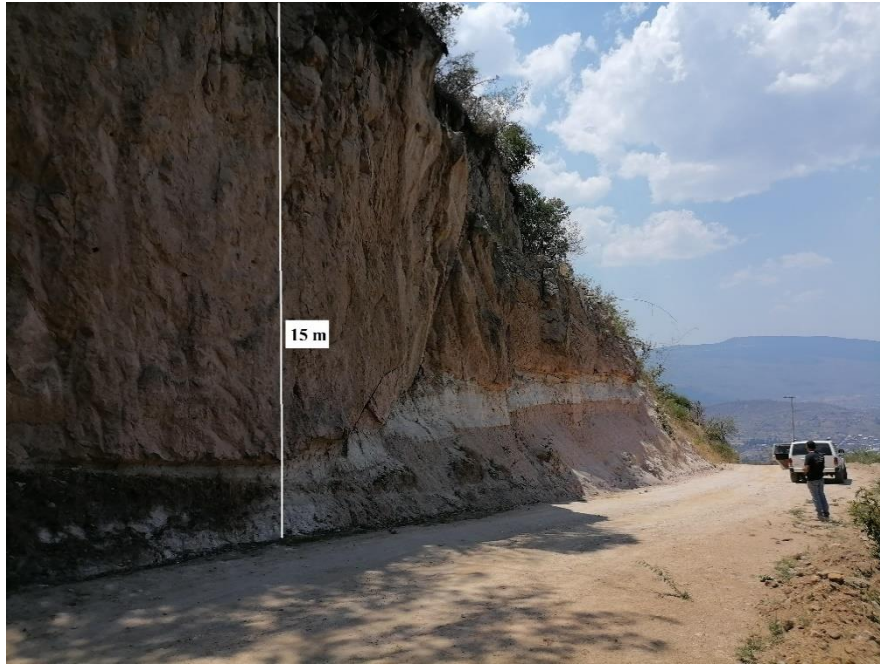


Figura 43. Afloramiento de la ignimbrita Cuitzeo, al norte de la localidad El Porvenir y sur del lago de Cuitzeo. El afloramiento es intercalado por un depósito de pómez (horizonte blanco) y presenta un fallamiento normal con dirección E-O que desplaza al horizonte.

Con respecto a las edades de esta subunidad, se reportan edades de 16.7 ± 0.22 a 16.3 ± 0.13 Ma (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Geomorfológica y estructuralmente, se caracteriza por conformar lomas y mesas alargadas ligeramente basculadas al sureste y dislocadas por estructuras distensivas con dirección NE-SO y E-O a ENE-OSO.



Figura 44. Afloramientos de ignimbrita Atécuaro-Morelia en la ciudad de Morelia. a) afloramiento de ignimbrita a un costado del periférico de Morelia, en la zona noroeste de la ciudad (colonia Manantiales). b) Ignimbrita color blanco en el C. Coronillas al sur de la ciudad de Morelia.

Particularmente, la Ignimbrita Atécuaro-Morelia constituye el principal material de construcción para los edificios coloniales del centro histórico. Coloquialmente, este material

es conocido como la *cantera rosa* de Morelia. Al norte de la ciudad se encuentra sobreyacida por los flujos piroclásticos del Pleistoceno *Alegría*, a la altura del Realito y Torreón Nuevo, como será descrito adelante.

9.3.1.3 Domos postcaldéricos Atécuaro-Punhuato

Esta es una unidad compuesta por domos de lava del Mioceno que se distribuyen al este y sureste de la Región de Morelia. Se trata del C. Punhuato y domos que bordean la depresión volcánica de la caldera de Atécuaro. Temporalmente, es una unidad posterior a las secuencias ignimbríticas Morelia-Cuitzeo. La unidad está dividida en dos subunidades: a) domos postcaldera de Atécuaro y b) domos del Punhuato.

a) Domos postcaldera de Atécuaro

Esta es una subunidad conformada por domos erosionados del Mioceno que bordean a la depresión volcánica de la paleo-caldera de Atécuaro. Particularmente, se concentran al suroeste y noreste del anillo caldérico. Se trata de domos y derrames de lava con estructura masiva de composición dacítica a andesítica (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Estos últimos autores reportan una edad de 16.31 ± 0.16 Ma para un domo al norte de la caldera. Con respecto a su estructura, se encuentran dislocados principalmente por estructuras con dirección NE-SO, pero también son afectados por estructuras E-O y en menor medida por estructuras inferidas NO-SE.

b) Domos del Punhuato

Es una subunidad geológica del Mioceno compuesta por domos de lava erosionados que se localizan al este de la ciudad de Morelia. El C. Punhuato está conformado por estructuras de domos erosionados y fracturados. Se trata de derrames de lava con estructura masiva y composición que va de dacítica a andesítica. En campo, en los cortes carreteros de ciudad Tres Marías se pueden encontrar depósitos de avalancha con bloques de más de 1 m de diámetro (Figura 45). Estratigráficamente, los domos del Punhuato sobreyacen a la Ignimbrita Atécuaro-Morelia, se reporta una edad para sus derrames de 16.3 ± 0.64 Ma (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015). Esta subunidad es cortada por estructuras NE-SO y E-O y se infieren estructuras con dirección N-S.

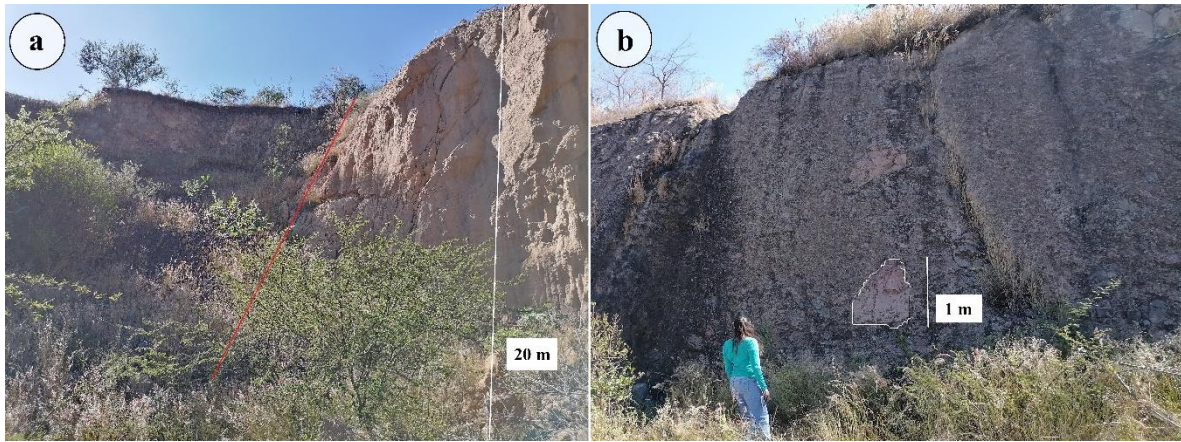


Figura 45. a) Contacto de falla entre derrames de lava del C. Punhuato (al fondo a la izquierda) y depósitos de caída del Pleistoceno (a la derecha), el contacto de falla aproximado se marca con una línea roja. b) Depósito de avalancha en la unidad de domos del Punhuato, se señala un bloque de 1 m de diámetro, más arriba de este se puede observar otro similar.

9.3.1.4 Volcanes y derrames Zapata-La Cruz

Esta es una unidad geológica conformada por estructuras de vulcanismo lávico del Mioceno Tardío que se distribuye de manera dispersa y limitada en la porción centro y norte de la región, entre el norte de Morelia y el margen sur del lago de Cuitzeo. Es una unidad de particular importancia ya que representa la reemergencia del vulcanismo en la región después de una ausencia de actividad volcánica de aproximadamente 8 Ma. Se divide en dos subunidades: a) conos y derrames Zapata y, b) domo La Cruz.

a) Conos y derrames Zapata

Es una subunidad compuesta por conos cineríticos, spatters y un volcán tipo escudo denominado Zapata. Se distribuye de manera dispersa en la porción noreste de la región y sur del lago de Cuitzeo. Está conformada por el volcán tipo escudo Zapata, al este de Cuto del Porvenir, 3 conos cineríticos al sur y este de la localidad Cañada de Los Sauces y 4 volcanes tipo *spatter* cerca de la localidad Las Canoas, que incluyen a los derrames de C. Largo y C. El Caracol (figura 46). Trujillo-Hernández (2017) reporta para los derrames del Zapata una composición de basalto-andesita y edades que van de 8.11 a 6.75 Ma y una edad de 8.26 ± 0.08 Ma para el C. Caracol. En cuanto a las relaciones temporales de estos edificios, todos se encuentran sobreyaciendo a las subunidades del Mioceno inferior derrames de lava Cuitzeo e Ignimbritas Cuitzeo. Estructuralmente, la subunidad es afectada por estructuras distensivas con dirección NE-SO y ENE-OSO.

b) Domos La Cruz

Es una subunidad compuesta por dos domos de lava aislados con edades del Mioceno Tardío que se localizan al oeste y noroeste de la ciudad de Morelia y porción centro de la región. Los domos La Cruz y Estadio se ubican en las faldas del C. Tetillas (Figura 46), al noreste de Cuto del Porvenir y al norte del estadio Morelos, respectivamente. Ambos domos de lava muestran una geoforma de domo erosionado, rodeados y semi-sepultados por los derrames de lava del volcán en escudo Tetillas. Se reporta una edad de 6.681 ± 0.073 Ma para el domo La Cruz (Avellán *et al.*, 2020). Con respecto a su estructura, estos se muestran dislocados por estructuras con dirección NE-SO.

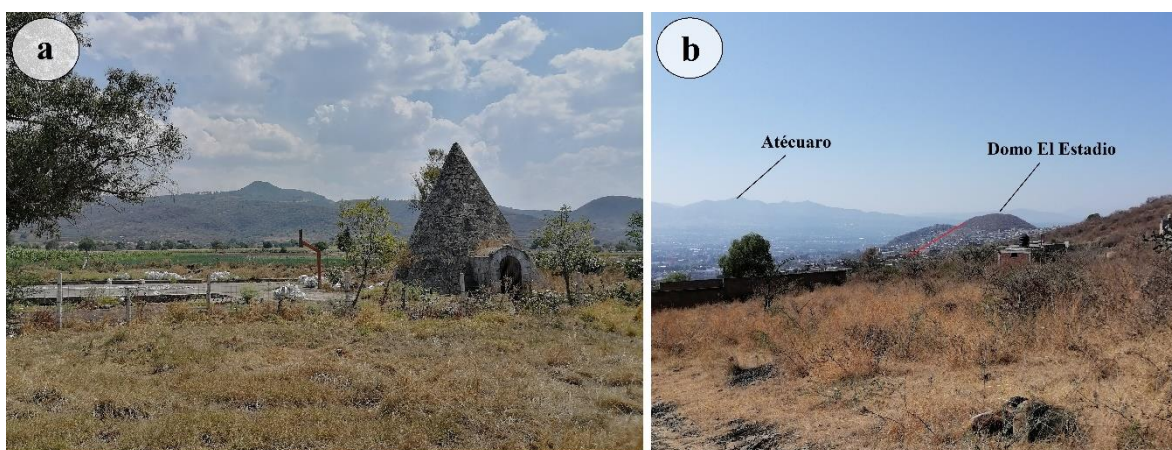


Figura 46. a) Al fondo y centro de la imagen sobresale el perfil del cono de lava C. Largo, al sur del lago de Cuitzeo. b) Se señala la geoforma del domo El Estadio, desde la ladera sur del volcán Quinceo, y también se sugiere con línea roja el rumbo de la falla denominada El Realito.

9.3.1.5 Secuencia fluvio-lacustre Morelia-Charo

La secuencia fluvio-lacustre Morelia-Charo es una unidad geológica del Mioceno-Plioceno que se expone en la porción centro oriental de la región, al este de la ciudad de Morelia. Se encuentra en la denominada Subcuenca-Morelia Charo, una antigua zona de sedimentación fluvio-lacustre que forma parte de la cuenca de Cuitzeo (Israde-Alcántara, 1995; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Los sedimentos lacustres también han sido identificados en el subsuelo de la ciudad de Morelia con espesores de entre 40-60 m, de acuerdo con información obtenida de pozos perforados (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2004). La secuencia está conformada por una sucesión de rocas terrígenas, biogénicas silíceas (diatomitas) y piroclásticas, con variaciones laterales de espesor y

granulometría (Israde-Alcántara, 1995; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Estratigráficamente, la secuencia sobryace de manera concordante a las rocas miocénicas de la Sierra de Mil Cumbres y es coronada por los depósitos piroclásticos El Porvenir, del Pleistoceno. En cuanto a las edades de la secuencia, se reporta un fósil vertebrado (*Rincontherium falconeri*) indicador del límite del Plioceno Inferior (Carranza-Castañeda, 1976 en Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999) y una edad de 3.6 Ma en la parte superior de la secuencia (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Morfológica y estructuralmente, la secuencia fluvio-lacustre Morelia-Charo se encuentra rellenando un relieve de lomeríos dislocados por estructuras de cinemática extensional con dirección NE-SO y E-O.

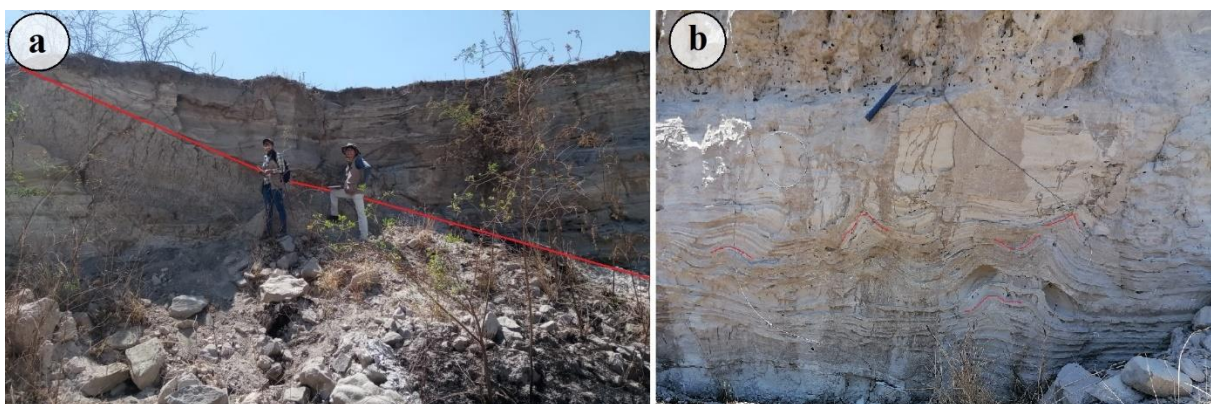


Figura 47. Afloramiento de secuencias lacustres de la subcuenca Morelia-Charo. a) Secuencia de sedimentos lacustres con fallamiento normal, con línea roja se señala la zona de falla. b) en el mismo afloramiento de la imagen "a" se observan estructuras de deformación sin-sedimentaria (sismitas), algunas estructuras se delinear sutilmente con líneas rojas.

9.3.1.6 Domos y derrames Leonera-Divisadero

Domos y derrames Leonera-Divisadero es una unidad geológica que se distribuye de manera dispersa al noroeste, centro y suroeste de la Región de Morelia. Se trata de una unidad compuesta por domos y flujos lávicos, con edades del Plioceno Inferior a Superior. Se divide en dos subunidades: a) derrames de lava La Leonera y b) domos y derrames Zoromuta-Divisadero.

a) Derrames de lava La Leonera

Es una subunidad que se localiza en el límite noroeste de la región, conformada por derrames de lava del volcán La Leonera. Abarca una pequeña parte del flanco sur de La Leonera, cuyo

centro de emisión se ubica 4 km al norte de la región. Los derrames de lava La Leonera presentan una composición de basalto-andesítico a andesita (Kshirsagar *et al.*, 2015). Estratigráficamente, sobreyace a los basaltos de Villa Morelos del Mioceno Tardío (Pasquarè *et al.*, 1991) y en la región subyace a los depósitos piroclásticos El Porvenir del Pleistoceno y derrames de lava del Holoceno cerca de Tendeparacua (Kshirsagar *et al.*, 2015). Estos últimos autores reportan para los derrames de La Leonera una edad de 4.433 ± 0.17 Ma. Con respecto a su estructura, la subunidad se encuentra muy afectada por fallamiento de tipo normal con direcciones NE-SO y E-O a ENE-OSO, con basculamiento al sureste y claras estructuras de semigraben.

b) Domos y derrames Zoromuta-Divisadero

Es una subunidad geológica compuesta por domos y derrames de lava del Plioceno que se distribuyen en la porción centro y suroeste de la Región de Morelia. Sus derrames de lava son de composición dacítica a andesítica, con excepción del spatter Lagunillas de composición andesítica-basáltica (Cardona-Melchor, 2015). De acuerdo con este último autor, las edades de esta subunidad están entre 3.8 ± 0.09 Ma (domo Zoromuta) y 2.6 ± 0.73 Ma (domo El Divisadero). Por otra parte, su morfología se encuentra afectada por estructuras de cinemática extensional de segundo a tercer orden con dirección NE-SO.

Esta es una subunidad que se distingue por estar inmersa en un relieve volcánico de edificios monogenéticos más jóvenes, en otras palabras, precede espacial y temporalmente al prolífero vulcanismo monogenético del Pleistoceno, plenamente relacionado con el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato.

9.3.1.7 Conos La Trampa

La unidad volcánica conos La Trampa es una pequeña unidad formada por dos conos contiguos que representan el primer evento volcánico registrado del Pleistoceno. Se ubica en el límite sur-suroeste de la región, aproximadamente a 7 km al suroeste de Acuitzio del Canje. Se trata de dos edificios volcánicos con derrames de lava de composición andesítica (Cardona-Melchor, 2015) que fluyen hacia el noreste con una longitud aproximada de 5 km. Se ha reportado una edad de 2 ± 0.05 Ma para los volcanes La Trampa y La Calavera (Cardona-Melchor, 2015). No se observan estructuras que disloquen a esta unidad.

9.3.1.8 Domos y derrames Santa Genoveva

Es una unidad conformada por domos y derrames de lava que se distribuyen al noroeste y suroeste del área de estudio. Particularmente, se concentran en la porción suroeste de la región, al sur y suroeste de Lagunillas. Estos edificios son de composición principalmente dacítica y las edades reportadas van de 1.9 ± 0.22 a 1.47 ± 0.34 Ma (Cardona-Melchor, 2015). No se observan estructuras que disloquen esta unidad a excepción del C. Cayihuanatin, un edificio aislado al noroeste de la región que es cortado por una estructura distensiva con dirección NE-SO.

9.3.1.9 Escudos Quinceo-Picacho

La unidad escudos Quinceo-Picacho es una unidad compuesta por volcanes de tipo escudo que se distribuyen en el sector occidental y central de la región. Presentan derrames de composición predominantemente andesítica (Kshirsagar et al., 2015; Avellán *et al.*, 2020). La unidad está conformada por 4 edificios volcánicos de dimensiones similares. En la ladera sur del Quinceo, las lavas son color gris oscuro, tienen textura afanítica y fenocristales de plagioclasa, piroxenos y aislados olivinos; también se encuentran muestras con textura porfírica y fenocristales de plagioclasa y piroxenos. En cuanto a su temporalidad, esta unidad pertenece al Pleistoceno Inferior. Se reportan edades de 1.557 ± 0.06 Ma para el volcán Picacho (Kshirsagar et al., 2015) y de 1.47 ± 0.14 y de 1.365 ± 0.10 Ma para el Quinceo (Gómez-Vasconcelos et al. 2015; Avellán et al., 2020). Por relaciones temporales, se infiere que también pertenecen a esta unidad los volcanes C. Irauco y C. La Trampa, al oeste y sur de la Región de Morelia, respectivamente. Referente a su estructura, las laderas de estos edificios se encuentran dislocadas por estructuras distensivas con orientación NE-SO y ENE-OSO.

Cabe resaltar que, durante el Pleistoceno, esta unidad representa el primer gran evento de vulcanismo conformado por volcanes tipo escudo.

9.3.1.10 Conos y derrames Pelón

Conos y derrames Pelón es una unidad de conos cineríticos que se distribuye en la porción oeste de la Región de Morelia. Geomorfológicamente, se caracteriza por presentar conos redondeados y pendientes de laderas suavizadas. Con respecto a la composición de las rocas de esta unidad, son de composición basáltica a andesítica (Kshirsagar *et al.*, 2015; Cardona-

Melchor *et al.*, 2015; Avellán *et al.*, 2020). Temporalmente, esta unidad se desarrolla durante el Pleistoceno Inferior y se reportan edades que van desde 1.545 ± 0.127 Ma para el C. Pelón, al sur del maar La Alberca, hasta 0.844 ± 0.099 Ma para el homónimo C. Pelón en el límite noroeste de la ciudad de Morelia (Kshirsagar *et al.*, 2015; Avellán *et al.*, 2020). En esta unidad se observan algunas estructuras de cinemática extensional con rumbo NE-SO y ENE-OSO, además de un lineamiento volcánico con dirección NE-SO al oeste de Lagunillas.

9.3.1.1 Depósitos piroclásticos El Porvenir

Depósitos piroclásticos El Porvenir es una unidad compuesta por depósitos piroclásticos del Pleistoceno que se distribuye ampliamente al norte y este de la región. Particularmente, se expone al suroeste del lago de Cuitzeo en donde se ubica la localidad tipo El Porvenir. Está conformada por depósitos de caída con intercalaciones de flujos de composición riolítica a riodacítica (Kshirsagar *et al.*, 2015; Gómez-Arango, 2019) con un contenido predominante de pómez, líticos de color negro, gris y anaranjado y fragmentos de vidrio y fenocristales. En campo se observan variaciones en cuanto a su granulometría, compactación y composición, por ejemplo, en El Porvenir y Tiristarán estos depósitos presentan una estructura continua horizontal con clastos de tamaño lapilli y grano-soportados. Por otra parte, generalmente, al este de la ciudad de Morelia, estos depósitos se muestran más finos con una mayor proporción de ceniza y menor cantidad de líticos y pómez. Con respecto a su temporalidad, al norte y este de la región, esta unidad sobreyace a las subunidades miocénicas derrames de lava de la Sierra de Mil Cumbres, derrames de lava Cuitzeo, Ignimbrita Cuitzeo e Ignimbrita Atécuaro-Morelia. Al este de Morelia sobreyace a la secuencia fluvio-lacustre Morelia-Charo del Mioceno-Plioceno y al noroeste es cubierta por los derrames de lava del Quinceo (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999; Avellán *et al.*, 2020). En cuanto a su edad, se han reportado numerosos fechamientos con edades muy similares, Avellán *et al.* (2020) reportan una edad de 1.48 ± 0.016 Ma. Estructuralmente, es afectada por estructuras con dirección NE-SO y particularmente afectada por estructuras extensionales con dirección ENE-OSO al norte de la región y sur del lago de Cuitzeo.

Es útil mencionar que, como no hay actividad volcánica reciente en el sector oriental de la región, esta unidad se reconoce fácilmente al estar siempre en una posición estratigráfica superior.

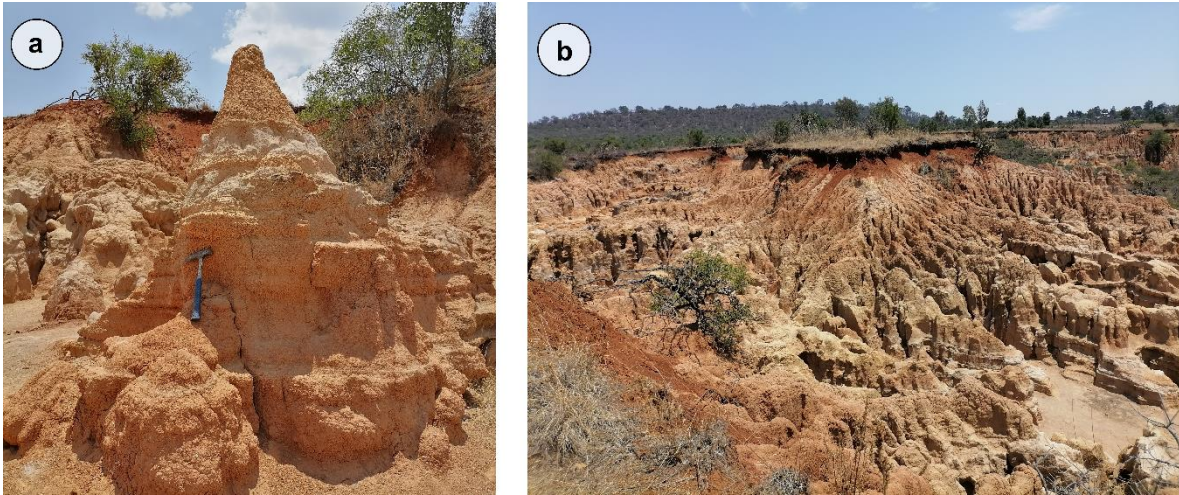


Figura 48. Imágenes del afloramiento del depósito piroclástico El Porvenir en la localidad tipo. a) Depósito piroclástico con morfología cónica a causas de los procesos de erosión que lo han afectado, localmente a este sitio se le conoce como Los Piloncillos, haciendo alusión a la forma semejante que tiene con el dulce típico. b) Formación de cárcavas en los depósitos piroclásticos El Porvenir.

9.3.1.12 Domos El Tzirate-Huracán

Se trata de una unidad volcánica compuesta por domos de lava del Pleistoceno que incluyen a la Sierra del Tzirate. Se distribuye al oeste y sur de la región. Está conformada por domos de lava de composición predominantemente dacítica (Pérez-Orozco *et al.*, 2018). Para esta unidad se reportan edades del Pleistoceno Inferior que van de 1.3 ± 0.3 a 930 ± 0.25 Ma (Cardona-Melchor, 2015; Pérez-Orozco *et al.*, 2018). Esta unidad es afectada por estructuras de segundo a tercer orden con dirección NO-SE, NE-SO y ENE-OSO. Además, se observan lineamientos de domos con dirección NO-SE y NE-SO en la Sierra del Tzirate y con dirección NE-SO al suroeste de la presa de Umécuaro en el límite sur-centro de la región donde se encuentran alineados los domos C. El Zopilote y C. El Pozole, entre otros.

9.3.1.13 Domos El Burro-La Taza

Es una unidad volcánica formada por domos de lava del Pleistoceno Medio que se distribuyen al suroeste y oeste del área de estudio. Para estos edificios se reportan composiciones de andesita-basáltica, andesitas y dacitas (Cardona-Melchor, 2015; Pérez-Orozco *et al.*, 2018). En cuanto a su temporalidad, las edades reportadas son de entre 0.7 ± 0.08 Ma para los domos El Burro y 0.37 ± 0.02 Ma para los domos La Taza (Cardona-Melchor, 2015). En cuanto a la estructura de esta unidad, no se observan claras discontinuidades que la disloquen, se infieren

estructuras con dirección NO-SE en los domos la Taza y con dirección NE-SO en el límite noroeste del C. Chato.

9.3.1.14 Escudos Águila-Tetillas

Es una unidad volcánica compuesta por volcanes tipo escudo del Pleistoceno que se distribuyen en la porción centro y occidente de la región. Se compone de 5 edificios volcánicos tipo escudo entre los que sobresalen los volcanes en escudo más prominentes de la región, El Águila y Tetillas. En esta unidad se incluye a los edificios secundarios somitales y relativamente contemporáneos del Tetillas, así como a los conos secundarios de El Águila. Se trata de edificios con derrames de composición andesítica a andesítica-basáltica. En la ladera sureste del Tetillas, junto al sector norte del periférico de Morelia, se presenta un afloramiento de derrames de lava con estructura masiva, la muestra de mano es de color gris oscuro con textura afanítica y fenocristales de piroxeno y olivino (Figura 49). En referencia a la temporalidad de los volcanes que integran esta unidad, las edades reportadas se encuentran entre 0.87 ± 0.05 Ma del volcán Sanambo (Nixon *et al.*, 1987), al noroeste del Águila, y se reportan dos edades del volcán Tetillas de 0.563 ± 0.078 Ma y 0.36 ± 0.08 Ma (Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015; Avellán *et al.*, 2020). Esta última edad es más cercana a las edades reportadas para los edificios somitales del volcán Tetillas que son de 0.346 ± 0.009 Ma para el cono y de 0.336 ± 0.008 Ma para el domo (Avellán *et al.*, 2020). En cuanto a su estructura, los edificios El Águila, El Remolino y Tetillas están dislocados por estructuras distensivas con dirección NE-SO y ENE-OSO.

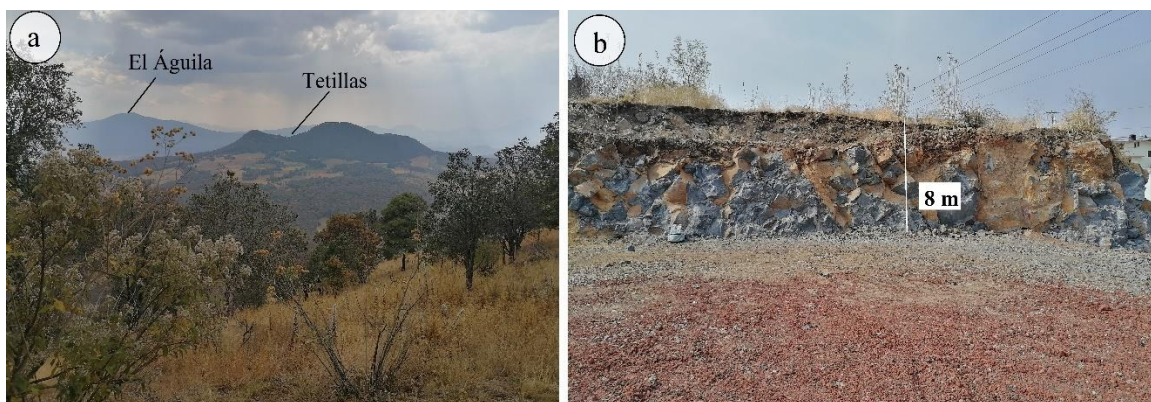


Figura 49. a) Imagen tomada desde la cima del Quinceo, en primer plano se observa el perfil del cono y domo somitales que coronan al volcán Tetillas, y en segundo plano se observa el perfil del volcán tipo escudo El Águila. b) Afloramiento de lavas del Tetillas, a un costado del libramiento de Morelia, al noroeste de la ciudad.

9.3.1.15 Conos y *spatters* Coro Grande

Conos y *spatters* Coro Grande es una unidad volcánica conformada por numerosos centros eruptivos con tipología de conos cineríticos y *spatters* que se distribuyen al suroeste, oeste y noroeste de la región. Esta unidad toma el nombre de un cono representativo que se ubica al oeste de la localidad de Coro Grande. Geomorfológicamente, la unidad se caracteriza por formar extensas mesetas de lava con pendientes suaves a moderadas. En cuanto a los productos volcánicos de esta unidad, en estos predomina una composición andesítica a andesítica-basáltica (Cardona-Melchor, 2015; Ramírez-Uribe *et al.*, 2019; Avellán *et al.*, 2020). Temporalmente, la unidad pertenece al Pleistoceno Medio a Superior y se reportan edades de entre 0.502 ± 0.072 Ma y 0.114 ± 0.029 Ma (Ramírez-Uribe *et al.*, 2019; Avellán *et al.*, 2020). Es una unidad en la que no se aprecian estructuras evidentes que la disloquen. Por otra parte, si se presentan lineamientos de centros volcánicos con direcciones NO-SE, NE-SO y ENE-OSO.

9.3.1.16 Domos La Muela

Domos La Muela es una unidad volcánica conformada por domos de lava que se distribuyen de manera dispersa en el suroeste y noroeste de la Región de Morelia. Particularmente se concentran en el sector suroeste de la región. Los productos volcánicos de esta unidad son de composiciones dacíticas a andesíticas (Cardona-Melchor, 2015; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018; Pérez-Orozco *et al.*, 2018). La temporalidad de esta unidad se sitúa en el Pleistoceno Superior. Para los eventos volcánicos superior e inferior se reportan edades de 0.14 ± 0.06 Ma para el C. Guadalupe y una edad de 11,490 a para los derrames superiores de la Muela (Cardona-Melchor, 2015; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018). Estructuralmente, no se observan lineamientos que afecten a los edificios a excepción de La Muela, el cual es particularmente dislocado por una estructura de tercer orden con dirección NNE-SSO a N-S.

Es relevante señalar que La Muela es un edificio volcánico complejo para el cual se reportan diferentes fechamientos de eventos con diferentes estilos eruptivos, por lo que no se considera un edificio de tipo monogenético (Osorio-Ocampo *et al.*, 2018).

9.3.1.17 Conos y maar Rancho Seco-Alberca

Es una unidad geológica conformada por volcanes con tipología de cono cinerítico, *spatter* y un *maar*. Se distribuye al oeste y suroeste de la región. Especialmente se muestra una

concentración al este, sur y oeste de la Sierra del Tzirate. Es una unidad distinguida por formar derrames de lava con morfología joven poco erosionada. Para esta unidad se reportan composiciones basálticas a andesíticas (Cardona-Melchor, 2015; Kshirsagar *et al.*, 2015; Ramírez-Uribe *et al.*, 2019). Con respecto a sus relaciones espaciales y temporales, los flujos de esta unidad se encuentran semi-sepultando a algunos derrames de lava de las unidades domos El Tzirate-Huracán y conos y *spatters* Coro Grande. Esta unidad pertenece al Pleistoceno Superior. Se reportan eventos que marcan el límite inferior y superior de la unidad con edades de 30,300 a para las lavas de Rancho Seco y de 12,570 a para el volcán Cerro Hueco (Kshirsagar *et al.*, 2015; Ramírez-Uribe *et al.*, 2019). Esta es una unidad que no exhibe estructuras de deformación frágil, con excepción del dislocamiento del borde oeste del maar La Alberca dislocado por una estructura normal con dirección ENE-OSO (Soria-Caballero *et al.*, 2019).

9.3.1.18 Conos y *spatters* Melón-Tendeparacua

Es una unidad volcánica conformada por conos y *spatters* que se distribuyen de manera dispersa en el sector occidental del área de estudio. Se trata de 5 centros eruptivos entre los cuales se encuentran los volcanes El Melón y La Mina, al oeste y noroeste de Capula y Los Lobos, al noroeste de Cuanajo. Para esta unidad se reportan composiciones de andesita a andesita-basáltica (Kshirsagar *et al.*, 2015; Ramírez-Uribe *et al.*, 2019). Las edades de estos eventos volcánicos pertenecen al Holoceno. Se reportan fechamientos de $11,470 \pm 170$ a A.P. para El Melón y de 6015 a A.P para Los Lobos (Osorio-Ocampo *et al.*, 2018; Ramírez-Uribe *et al.*, 2019). En esta unidad no se aprecian estructuras recientes que la disloquen.

9.3.1.19 Escudo El Frijol

La unidad volcánica escudo El Frijol está conformada por un edificio de tipo escudo que se localiza en el límite suroeste de la región, al este-suroeste de la localidad de Cuanajo. Osorio-Ocampo *et al.* (2018) reportan que El Frijol consiste en derrames de lava de color gris-oscuro con estructura masiva y en bloques. Temporalmente, corresponde al Holoceno y representa el evento volcánico más joven de la región. De acuerdo con un fechamiento arqueomagnético, la edad de El Frijol es de 3,906 a A.P. (García-Quintana *et al.*, 2016). También se reporta una edad radiométrica de 3,230 a A.P (Osorio-Ocampo *et al.*, 2018). En

cuanto a su estructura, sobresale la morfología elongada que presenta su cima, con dirección E-O.

9.3.1.20 Depósitos fluvio-lacustres y epiclásticos recientes

Esta es una unidad conformada por materiales removilizados y depósitos superficiales recientes que se extienden en toda el área de estudio. Se divide en dos subunidades: a) depósitos epiclásticos (lahares y avalanchas) y, b) depósitos superficiales.

a) Depósitos epiclásticos

Es una subunidad de depósitos de lahares y avalanchas que se distribuyen en el sector sureste de la zona de estudio. Estos depósitos están asociados a los materiales retransportados de las unidades geológicas miocénicas de este sector y se encuentran delimitados por estructuras con dirección NO-SE a ONO-ESE, NE-SO y E-O.

b) Depósitos superficiales

Es una subunidad de depósitos terrígenos recientes que se encuentra rellenando los valles y las planicies o partes bajas de toda la Región de Morelia.

9.3.2 Sistemas estructurales en espacio y tiempo de la Región de Morelia

En este apartado se describen los sistemas estructurales de la región, con base en el análisis de las unidades geológicas que son afectadas por el fallamiento regional y la integración de información bibliográfica. En la Región de Morelia se han descrito dos grandes eventos de deformación, los cuales están asociados a tres sistemas estructurales que se exponen con especial intensidad en la porción norte y este. El primero corresponde a un sistema con dirección NNO-SSE a NO-SE que se asocia a un primer gran evento de deformación claramente separado de eventos posteriores. El segundo corresponde a estructuras con dirección NE-SO y el último con dirección E-O a ENE-OSO, ambos sistemas agrupados al segundo gran evento de deformación. Cabe destacar la orientación ortogonal del primer sistema con los dos últimos. Se trata de tres sistemas estructurales de deformación frágil que han configurado la geometría del relieve volcánico de la región, propiciando la formación de lagos y el emplazamiento de volcanes, desde el Mioceno hasta el presente.

9.3.2.1 Sistema NO-SE a NNO-SSE

Corresponde al sistema estructural más antiguo, conformado por estructuras con dirección NO-SE a NNO-SSE. Se distribuye en todo el sector oriental del área de estudio con estructuras inferidas de segundo a tercer orden. Estas estructuras alinean la morfoestructura erosionada de las unidades geológicas más antiguas de la región, representado por un gran bloque con dirección NNO-SSE. Cinemáticamente, es un sistema de fallas normales (secundariamente normales-direccionales) con planos inclinados 60-70° al NE y SO (Mennella *et al.* 2022). Al sur de Morelia, uno de los lineamientos representativos del sistema corresponde a la cañada del río Chiquito, la cual sigue la orientación NO-SE de una falla normal que buza hacia el suroeste y corta unidades de lava e ignimbrita del Mioceno (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2004; Garduño-Monroy *et al.* 2009). Temporalmente, el sistema estructural se caracteriza por afectar a las unidades miocénicas de la región, que en la región abarcan hasta hace aproximadamente 16 Ma. De acuerdo con un análisis geológico-estructural, en la región este sistema es cortado por sistemas de planos con dirección ENE-OSO y NE-SO y no se reportan unidades cuaternarias que hayan sido afectadas por este primer sistema (Mennella *et al.*, 2022). Se ha propuesto que sus estructuras han sido reactivadas en respuesta al campo de esfuerzos reciente como fallas con desplazamiento lateral derecho (Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Olvera-García *et al.*, 2020b; Mennella *et al.*, 2022). En la porción occidente del área de estudio este sistema es poco visible, el extenso vulcanismo del Plio-Cuaternario cubre las posibles estructuras en el área. Por otro lado, si se aprecian lineamientos volcánicos con la misma orientación, p. ej. Rancho Seco y la Sierra del Tzirate.

9.3.2.2 Sistema NE-SO Mil Cumbres

Este es un sistema formado por estructuras de fallamiento normal con dirección NE-SO. Se distribuye en toda el área de estudio con particular expresión al sureste, este y centro de la región con estructuras de primero a tercer orden con arreglo *en échelon*. Estas estructuras delimitan importantes bajos estructurales como el parteaguas de la región hidrográfica del Balsas y las planicies de Morelia y Tiripetío-Santiago Undameo. Otras estructuras representativas de este sistema se pueden observar cortando la mancha urbana de Morelia (p. ej. Falla Nocupétaro) o dislocando la paleo-caldera de Atécuaro y el C. Punhuato. Con

respecto a su cinemática y temporalidad, en la ciudad de Morelia se reconocen dos direcciones de deslizamiento, la primera presenta un desplazamiento lateral izquierdo con *pitch* de 0-15° y la segunda presenta estrías subverticales de fallamiento normal (Garduño-Monroy *et al.*, 2009).

Durante el Mioceno Tardío, este sistema actuó en una primera fase como fallamiento lateral izquierdo dando lugar a la formación de extensos depósitos aluviales y angostas franjas de depósitos lacustres paralelas a la dirección del sistema, posteriormente, durante el Plioceno se desarrolló como un sistema extensional NO-SE que propició la mayor expansión y profundidad de los depósitos lacustres de la antigua subcuenca Morelia-Charo (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 2004; Garduño-Monroy *et al.* 2009). En el área de estudio, desde el punto de vista de un análisis morfológico regional, estructuras con esta misma dirección dislocan claramente a unidades volcánicas con edades superiores al Pleistoceno Inferior. En relación con otros sistemas estructurales, al noroeste del área de estudio, en las laderas intensamente dislocadas del volcán Pliocénico La Leonera, se aprecian estructuras con dirección NE-SO cortadas por un sistema más joven ENE-OSO. En cuanto a su relación con el vulcanismo, esta es la dirección dominante de los lineamientos volcánicos identificados en el occidente de la región. En el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato esta dirección de fallas está asociada a una dirección predominante de lineamientos volcánicos (Connor, 1990).

Es importante señalar que en la ciudad de Morelia este sistema forma parte de las estructuras que influyen en los procesos de subsidencia creep-falla (Garduño-Monroy *et al.*, 2001; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006) que han afectado a la parte baja y densamente poblada de la ciudad, que también posee una orientación prevalente NE-SO.

9.3.2.3 Sistema E-O Morelia-Acambay

Es un sistema de fallas normales con dirección E-O a ENE-OSO que se desarrolla como una franja transtensiva situada en la porción centro-occidental de la Faja Volcánica Transmexicana (Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Mennella *et al.*, 2022). Afecta fuertemente al sector norte, noroeste y centro-este de la región con estructuras de primero a tercer orden. En la porción suroeste este sistema tiene escasa expresión. Al sur y noreste de Morelia sobresalen por su longitud y morfología escarpada de la falla Morelia (también denominada La Paloma)

(Figura 50) y falla Tarímbaro-Álvaro Obregón, con direcciones E-O a ENE-OSO, con longitudes aproximadas de entre 15 y 20 km y desniveles mayores a 200 metros.



Figura 50. Fotografía tomada al sur de Morelia con vista hacia el este de la región. En el centro se observa el periférico de Morelia; al fondo a la izquierda el C. Punhuato y; a la derecha el escarpe de la falla Morelia, la cual forma parte del sistema E-O Morelia-Acambay, esta falla geológica delimita al sur el bajo estructural donde se asienta la ciudad de Morelia.

Al norte de la región, se distingue la depresión alargada con dirección E-O del lago de Cuitzeo. En relación con su cinemática, los datos indican que el Sistema de Fallas Morelia-Acambay inicialmente se formó como un régimen transtensional de máximo esfuerzo horizontal orientado NNE-SSO, con fallamiento lateral izquierdo y un desplazamiento incipiente pero constante, para posteriormente desarrollarse en extensión NNO-SSE (Mennella et al., 2022). Las fallas de este sistema comenzaron su actividad a partir del Mioceno Medio-Tardío (7-9 Ma) (Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Mennella *et al.*, 2022). De acuerdo con Israde-Alcántara y Garduño-Monroy (1999), durante el Plioceno, el fallamiento y basculamiento regional del Sistema de Fallas Morelia-Acambay modificó la dinámica hidrológica y propició la migración y el desarrollo de zonas lacustres más al norte de Morelia, donde se encuentra actualmente la depresión del lago de Cuitzeo.

Es un sistema que se considera sísmicamente activo y se le atribuyen eventos sísmicos históricos dentro y en zonas aledañas a la Región de Morelia (Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Suter, 2009; Soria-Caballero *et al.*, 2019 y 2021; Mennella *et al.*, 2022). En la cartografía geológica se puede apreciar en forma evidente por su morfología como este sistema ha dislocado con intensidad a unidades geológicas del Mioceno al Pleistoceno Medio. Con relación al vulcanismo, al noroeste de la región y norte del Cerro Picacho, se puede observar un paralelismo entre este sistema estructural y un lineamiento de conos cineríticos y spatters con dirección ENE-OSO.

X. DISCUSIÓN

De acuerdo con Brilha (2016), el primer paso en el desarrollo de cualquier proyecto de geoconservación inicia con el reconocimiento de sus características geológicas. El análisis y cartografía de geformas volcánicas, morfoestructural (paisajes) y geológica que resulta de esta investigación brinda un panorama integrado y actualizado de la geodiversidad de la Región de Morelia y una primera etapa para plantearse las estrategias de geoconservación. A su vez, representa una metodología basada en el análisis del paisaje y la geología que podría ser aplicado a otras problemáticas (e.g. geológico ambientales), así como en otros casos de estudio.

El reconocimiento de los valores de la geodiversidad y el patrimonio geológico es el fundamento de la geoconservación. Por lo tanto, la difusión del conocimiento geológico concluido en este trabajo por medio de un lenguaje comprensible y sobre todo con la presentación de material de investigación (mapas y texto) y didáctico (e.g. ilustraciones divulgativas), que involucren otras formas de percepción del patrimonio, exhortando a la transdisciplinariedad y atendiendo al enfoque holístico característico de las estrategias de geoconservación, representa una propuesta para la continuidad de este trabajo y la generación de propuestas concretas de geoconservación. Se es consciente que a partir de los resultados de este trabajo se pueden derivar diversas propuestas como la elaboración sistemática de la estrategia de geoconservación en instancias institucionales (e.g. IMPLAN), que se ocupan del desarrollo y crecimiento de la ciudad, así como desde el punto de vista de la socialización, realizar guías geoturísticas y manuales de prácticas escolares como se ha implementado por ejemplo en el Geoparque Mixteca Alta (Orozco-Ramírez, 2023). Sin embargo, esencialmente por tiempo y razones metodológicas todas requieren diferentes aproximaciones y se encuentra fuera de los alcances de este trabajo.

Sin embargo, se presenta una discusión que busca resaltar la geodiversidad de la Región de Morelia y la identificación de los grandes eventos geológicos (su historia geológica), expresada en mapas, textos y anexos. Se discute su importancia (y su ausencia) como

alternativa y en particular su potencial como herramienta en la implementación de los programas institucionales para afrontar las problemáticas geológico-ambientales y de desarrollo sustentable. Se discute también la importancia de generar y construir una población informada de su geopatrimonio para la participación ciudadana en las decisiones sobre el aprovechamiento y cuidado de los recursos naturales de su territorio.

10.1 El municipio de Morelia, una región de volcanes y lagos: cronología de eventos geológicos desde hace más de 30 millones de años

La región del municipio de Morelia, ubicada en la porción centro-occidental de la Faja Volcánica Transmexicana, es una región con una historia geológica configurada eminentemente por procesos volcánicos y tectónicos de deformación frágil, que también han dado lugar a la formación de lagos, extintos y presentes, desde hace más de 30 Ma (Figura 41).

En el sector sureste de la región se exponen las rocas más antiguas, las cuales son representadas por la sucesión volcánica Tafetán-Mil Cumbres. Esta es una sucesión de derrames de lava, rocas epiclásticas e ignimbritas que fueron depositadas y parcialmente deformadas por una fase tectónica compresiva breve desarrollada durante el Mioceno Temprano, claramente posterior a la orogenia Larámide (Pasquarè *et al.*, 1991).

Posteriormente, durante el Mioceno Temprano, una actividad volcánica predominantemente efusiva y de composición intermedia generó extensas mesas de lava y complejos de domos, actualmente erosionados y altamente fracturados, que se exponen de manera yuxtapuesta a la Formación Tafetán y por lo tanto en el mismo sector oriental de la Sierra de Mil Cumbres. Estas sucesiones volcánicas se refieren al registro de localidades con edades de entre 23.1 y 18.3 Ma (Pasquarè *et al.*, 1991; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015; Avellán *et al.*, 2020). Estas sucesiones volcánicas se correlacionan con otras secuencias a lo largo de la porción centro de México, p. ej. la Sierra de Angangueo y la Sierra de Guanajuato (Cerca-Martínez *et al.*, 2000; Ferrari *et al.*, 2012; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015; Hernández-Bernal *et al.*, 2015). En el centro de México este tipo de vulcanismo es distintivo y abarca un amplio periodo, pero con actividad volcánica discontinua de entre 25 y 13 Ma, con un pico magmático entre los 18 y 15 Ma (Hernández-Bernal *et al.*, 2015).

Ferrari *et al.* (2012) consideran que la Faja Volcánica Transmexicana inició su actividad magmática entre el Mioceno Inferior a Medio como resultado de la rotación antihorario del arco volcánico del Oligoceno con orientación NNO-SSE de la Sierra Madre Occidental, cuyo magmatismo está relacionado a la subducción de la extinta placa oceánica de Farallón: esta rotación daría lugar al establecimiento del actual arco volcánico con dirección E-O de la Faja Volcánica Transmexicana, como resultado de la subducción de las placas oceánicas de Cocos y Rivera. Señala también, que la actividad de la Sierra Madre Occidental puede ser distinguida del inicio de la Faja Volcánica Transmexicana por un drástico cambio en el estilo eruptivo, ya que la primera se caracteriza por el dominio de un vulcanismo silíceo y altamente explosivo. Sin embargo, en la Región de Morelia, el emplazamiento de amplios derrames lávicos durante el Mioceno Inferior, que podrían estar asociados al inicio de la Faja, están cubiertos por al menos cuatro pulsos silíceos explosivos, productos de la erupción de las paleo-calderas de colapso La Escalera (22.9 Ma), Puerto La Sosa (20.5 Ma) y Atécuaro (16.7-16.3 Ma), además de otro evento ignimbrítico de fuente desconocida que se expone al sur del lago de Cuitzeo con una edad de 17.1 Ma, seguidos por la formación de domos post-caldéricos dacíticos a andesíticos con edades no menores a 16.3 Ma (Figura 51; Pasquarè *et al.*, 1991; Gómez-Vasconcelos *et al.*, 2015; Trujillo-Hernández *et al.*, 2022).



Figura 51. Fotografía del paisaje de sierra y domos de la Sierra de Mil Cumbres, al oeste de la localidad La Escalera. Al frente se observan las geoformas de domos erosionados.

Adicionalmente, las unidades geológicas del Oligoceno-Mioceno Inferior, expuestas en toda la porción oriental de la región, constituyen un bloque elevado con orientación prevalente

NNO-SSE, afectado por un sistema tectónico distensivo con dirección NO-SE a NNO-SSE que no afecta a las rocas de la región menores a 16 Ma, aunque si se presentan lineamientos volcánicos con la misma dirección y posibles reactivaciones en respuesta al campo de esfuerzos reciente (Pasquarè *et al.*, 1991; Olvera-García *et al.*, 2020b; Mennella *et al.*, 2022). Hacia el sureste del área de estudio, la estructura miocénica de Tafetán-Mil Cumbres ha sido intensamente deformada, disectada y exhumada por un sistema estructural que aparentemente representa una fase compresiva, la cual es evidenciada por una estructura de primer orden con dirección NNO-SSE renombrada el anticlinal de Tzitzio-Tiquicheo (Mauvois *et al.*, 1977; Pasquarè *et al.*, 1991). La información referente a la sucesión Tafetán es limitada y el trabajo de campo en la zona es complicado debido a las condiciones del terreno, caracterizado por un paisaje de sierra y profundos valles modelados por la erosión, fracturamiento y fallamiento al cual ha estado sometido desde el Oligoceno, por lo tanto, se requieren estudios más locales para su caracterización.

Durante el Mioceno Medio, la actividad volcánica es interrumpida por completo en la Región de Morelia en lo que representa un hiatus magmático. De hecho, Ferrari *et al.* (2012) proponen que, la ausencia de vulcanismo durante el Mioceno Medio en el centro y occidente de la FVTM se debe a la joven edad (<8 Ma) de la placa de Cocos, en subducción al oeste de la fractura de Orozco. Tras 8 Ma sin aparente actividad tectónica y volcánica, el paisaje de la región comienza a transformarse progresivamente a partir del Mioceno Tardío al Plioceno Temprano, por medio de un vulcanismo plenamente identificado con la erupción del volcán en escudo Zapata de 8.1-6.7 Ma (Trujillo-Hernández, 2017) y otros centros eruptivos de composición principalmente intermedia a máfica distribuidos de manera limitada al noreste, centro y noroeste de la región.

Al parecer, por el registro del vulcanismo y de manera simultánea, comienza a desarrollarse un sistema tectónico transtensivo con dirección NE-SO que favorece la formación de una subcuenca fluvio-lacustre, cuyos depósitos se distribuyen entre los municipios de Morelia y Charo. Sucesivamente, durante el Plioceno el fallamiento y basculamiento regional del Sistema de Fallas Morelia-Acambay, con una cinemática de un sistema extensional con dirección E-O a ENE-OSO, con un ligero componente lateral izquierdo, propició su extinción y la migración de zonas lacustres hacia el norte de Morelia, donde se ubica el actual lago de Cuitzeo (Israde-Alcántara, 1995; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Cabe señalar

que, la secuencia fluvio-lacustre de la subcuenca Morelia-Charo presenta intercalaciones de depósitos piroclásticos, los cuales podrían estar relacionados a los productos de las unidades volcánicas del Mioceno Tardío al Plioceno de la porción centro y suroeste de la región (p. ej. domos La Cruz y domos y derrames Zoromuta-Divisadero).

A finales del Plioceno (3.8-2.6 Ma), una moderada actividad volcánica concentrada en el suroeste de la región precede espacial y temporalmente a un profuso y continuo vulcanismo que se desarrolló del Pleistoceno al Holoceno (2 Ma-3200 a AP) y modificó completamente el paisaje de todo el sector occidental de la región (Figura 52). Se trata de una sucesión de edificios predominantemente monogenéticos con geoformas volcánicas que incluye domos, conos cineríticos, *spatters*, escudos y un *maar*. También se encuentra un singular depósito de caída de 1.4 Ma, producto de una atípica erupción pliniana, que corona a las unidades volcánicas miocénicas del sector oriental de la región (Gómez-Arango, 2019). Esta última fase de vulcanismo en la región forma parte del inicio de la actividad del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, y del último episodio magmático de la Faja Volcánica Transmexicana (Hasenaka y Carmichael, 1985; Ferrari *et al.*, 2012). Se estima que la actividad del campo inició hace 3 Ma (Hasenaka y Carmichael, 1985). En la Región de Morelia se tiene vulcanismo registrado desde hace 3.8 Ma (Cardona-Melchor, 2015) con la erupción del domo Zoromuta. Por otra parte, en esta región no se observa una migración N-S del vulcanismo del campo desarrollada entre 2-1 Ma, como se ha propuesto anteriormente (Ban *et al.*, 1992). Se puede distinguir una actividad volcánica moderada e intermitente dominada por morfologías de domos que inicia a finales del Plioceno y se intensifica desde hace 2 Ma con la erupción de un continuo vulcanismo bimodal, donde aparentemente durante el Holoceno prevalece el emplazamiento de conos cineríticos y *spatters*; es decir el vulcanismo monogenético bien representado al oeste de la zona de estudio.

Finalmente, con respecto al Sistema de Fallas Morelia-Acambay, el sistema tectónico más reciente o de neotectónica se refiere al hecho que afecta a la mayor parte de las últimas unidades volcánicas Plio-Cuaternarias. De acuerdo con algunos autores (Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Suter, 2016; Soria-Caballero *et al.*, 2019 y 2021; Mennella *et al.*, 2022), este sistema es considerado sísmicamente activo y se le atribuyen eventos sísmicos históricos dentro y en zonas aledañas al área de estudio. No obstante, cabe señalar que, en la región, este sistema se encuentra dislocando, de manera morfológicamente evidente, a unidades del

Pleistoceno Inferior, no así a las unidades volcánicas del Pleistoceno Superior, lo cual sugiere que podría significar un fechamiento relativo de la actividad tectónica del sistema de extensión. Sin embargo, se requieren más dataciones clave para delimitar esta idea, principalmente en la porción noroeste de la región, ya que al suroeste este sistema es poco visible.



Figura 52. Panorámica del paisaje volcánico Plio-Cuaternario de la Región de Morelia, tomada desde la ladera norte del C. El Águila. Al centro se observan los conos cineríticos Cerritos y Jamanal, actualmente explotados como bancos de material.

10.2 La Geo-diversidad volcánica y de paisajes de la Región de Morelia

En la Región de Morelia se identificaron un total de 216 centros volcánicos, de los cuales 72 fueron clasificados como conos cineríticos, 28 *spatters*, 1 *maar*, 61 domos, 11 escudos, 3 paleo-calderas y 40 domos erosionados (Tabla 2; Figura 24). Los edificios volcánicos clasificados como cono cinerítico, *spatter*, *maar*, domo y escudo pertenecen temporalmente a las geoformas volcánicas desarrolladas a partir del Mioceno Tardío (~8 Ma). Por otro lado, las clasificaciones de paleo-caldera y domo erosionado corresponden al vulcanismo con edades de >16 Ma (Mioceno Inferior).

Esta distinción temporal se relaciona directamente con el paisaje, donde las geoformas más antiguas (Oligoceno-Mioceno Inferior) presentan una morfología muy erosionada y/o dislocada por estructuras tectónicas de diferentes fases de deformación, lo cual dificulta la identificación de su morfología original, en comparación con geoformas volcánicas más

jóvenes. De hecho, la clasificación de domos dacíticos-andesíticos erosionados es la que posee mayor incertidumbre para poder ser descritos y estudiados.

Cabe destacar que, a partir del análisis morfoestructural del sureste de la región, se propone la ubicación de una paleo-caldera (Puerto La Sosa), cuyos depósitos han sido anteriormente fechados y descritos brevemente (Figuras 24, 29b y 30; Pasquarè et al., 1991). De acuerdo con estos resultados, después de un periodo sin actividad volcánica (~16 a 8 Ma), desde el Mioceno Tardío y con el inicio de la actividad de la Faja Volcánica Transmexicana, en la región ocurrieron 173 erupciones volcánicas, de las cuales 163 son identificadas como parte de la actividad magmática Plio-Cuaternaria del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985).

Con respecto al análisis de paisaje, han sido definidos 18 dominios morfoestructurales. Cada uno de ellos posee características distintivas y representan unidades o bloques de paisaje modelados por procesos morfogenéticos particulares. Es decir, esta clasificación, representa *per se* una propuesta de geodiversidad de paisaje en la Región de Morelia (Figura 30).

Los dominios más antiguos son representados de manera cronológica por: sierra y paleo-caldera La Escalera, paleo-caldera de Atécuaro, sucesión volcánica de Cuitzeo y subcuenca Morelia-Charo. Estos fueron construidos esencialmente por una sucesión de vulcanismo lávico y silíceo explosivo asociado al colapso de calderas del Mioceno y relacionado a la Sierra Madre Occidental (Pasquarè *et al.*, 1991).

El paisaje antiguo de la Región de Morelia, también se distingue de dominios más jóvenes al ser afectados por un sistema morfoestructural con dirección NO-SE a NNO-SSE que delinea los límites de estos dominios, corta a sus unidades volcánicas y orienta a las principales redes de drenaje. Al ser los dominios más antiguos, son también afectados por sistemas morfoestructurales más jóvenes con direcciones NE-SO a E-O. Por lo tanto, representan a los dominios con mayor grado de deformación por fallamiento y erosión. Por otra parte, estos presentan diferencias importantes.

El dominio sierra y paleo-caldera La Escalera representa un amplio paisaje de sierra con una profunda disección del relieve en donde predominan las pendientes fuertes. También sobresale un drenaje dendrítico a subdendrítico altamente desarrollado que fluye hacia la región hidrográfica del Balsas, a diferencia del resto de los dominios que pertenecen a la

región hidrográfica Lerma-Santiago. Por otro lado, los dominios paleo-caldera de Atécuaro y sucesión volcánica de Cuitzeo se caracterizan por presentar extensas mesas ignimbríticas dislocadas y basculadas, que en el caso del dominio paleo-caldera de Atécuaro es distinguido por una depresión volcánica central (paleo-caldera de Atécuaro) rodeada de montañas bajas a intermedias.

Sin embargo, es oportuno mencionar que el paisaje antiguo se observa modificado y renovado en relación con las expresiones morfológicas asociadas con un extendido depósito volcánico de caída del Pleistoceno (depósito piroclástico El Porvenir) que cubre (mantea) las geoformas y bloques tectónicos erosionados del dominio sucesión volcánica de Cuitzeo y parte del dominio subcuenca Morelia-Charo. En un sitio al sur de la localidad El Porvenir, dentro del subdominio mesas de El Porvenir, este depósito expone singulares geoformas erosivas con morfología cónica, por lo que la gente ha llamado a este sitio *Los Piloncillos*, haciendo alusión a la semejanza del dulce tradicional mexicano con sus geoformas (Figura 48).

Con respecto al dominio de paisaje de la subcuenca Morelia-Charo, representa un paisaje transicional entre la actividad magmática del Mioceno inferior al Mioceno tardío, cubriendo un periodo en el que la actividad volcánica y tectónica estuvo ausente, pero cuya reactivación es evidenciada por la formación de una antigua zona de sedimentación fluvio-lacustre que responde a un nuevo régimen tectónico extensional.

Este nuevo régimen tectónico es asociado a la deformación intra-arco de la Faja Volcánica Transmexicana (Ferrari *et al.*, 2012) y en la región puede apreciarse con lineamientos morfoestructurales con dirección NE-SO a E-O, como el curso del río Grande de Morelia, el cual atraviesa a este dominio de NE a SO. Como resultado de estos procesos morfogenéticos, la subcuenca está compuesta por un paisaje volcánico y fluvio-lacustre de lomeríos y montañas bajas. Los dominios Morelia, planicie Tiripetío-Santiago Undameo, planicie Tarímbaro-Álvaro Obregón y planicie Zacapu representan bloques de paisaje sin actividad volcánica reciente con orientación NE-SO a ENE-OSO, condicionados también por la tectónica extensional de la FVTM. Estas planicies se caracterizan por formar zonas bajas y planas con ligera inclinación. Las planicies Tarímbaro-Álvaro Obregón y Zacapu se encuentran a alturas mínimas de 1840 y 2000 m s.n.m., respectivamente, con desniveles de

entre 40-50 m. Por otro lado, la planicie Tiripetío-Santiago Undameo se mantiene sin un relativo desnivel a 2020 m s.n.m. Con relación al dominio Morelia, este representa una estrecha planicie con lomas bajas y orientación NE-SO inmersa en la alta densidad poblacional de la ciudad de Morelia, definiendo así una importante zona vulnerable a los riesgos hidrológicos. Se encuentra a una altura de entre 1900-1960 m s.n.m.

Por su parte, la porción occidental de la Región de Morelia es representada por un escenario de paisajes dominado por el emplazamiento de una serie de edificios volcánicos Plio-Cuaternarios relacionados al magmatismo del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato. Los 12 dominios morfoestructurales distribuidos en este sector se diferencian entre sí, principalmente, por el tipo de geoformas volcánicas predominantes, direcciones morfoestructurales preferenciales, así como su temporalidad. Este último factor, además de ser considerado por los numerosos fechamientos recopilados de la bibliografía, es apreciado por el relativo grado de erosión de las estructuras volcánicas, el cual puede ser comparado con la morfología de edificios datados y por relaciones de corte con estos últimos.

Finalmente, al sur y noroeste de la región, los dominios sucesión de domos La Taza-La Nieve y Sierra del Tzirate son dominados por la concentración de abundantes domos de lava de composición félsica, asociados con algunos edificios dispersos de conos cineríticos y *spatters*.

En estos dos dominios se encuentran dos de las cimas más altas de la región, en el C. El Tzirate (3320 m s.n.m.) y C. La Nieve (3420 m s.n.m.), ambos domos. Los dominios Picacho-La Trampa, volcanes escudo de Morelia y volcanes de Sanambo se caracterizan por presentar edificios principales de tipo escudo que, a excepción del dominio Picacho-La Trampa, subyacen a otros pequeños centros eruptivos secundarios con geoformas de conos cineríticos, domos y *spatters*.

En esta zona, destaca la morfoestructura emblemática y elongada del dominio volcanes escudo de Morelia, que atraviesa a la región con dirección NE-SO y un eje aproximado de 30 km con los volcanes tipo escudo más prominentes de la región, El Águila-Remolino y Quinceo-Tetillas, condicionando así un importante alto estructural al centro de la región (Figura 53). Por otro lado, los dominios volcanes de la Providencia y mesa volcánica de

Rancho Seco presentan un homogéneo paisaje de conos cineríticos, pero de diferentes temporalidades.



Figura 53. Fotografía tomada durante una excursión al C. Quinceo. Al frente se observa los edificios somitales del volcán Tetillas y al fondo el C. El Águila.

Los dominios conos de Tanimireche y mesa volcánica de Morelia son distinguidos por la predominancia de volcanes con tipología de conos cineríticos y *spatters*, un bajo grado de erosión y un pobre desarrollo del drenaje superficial. De estos últimos, sobresale el dominio mesa volcánica de Morelia, distribuido en el límite oeste del municipio de Morelia, debido a la notoriedad de un extendido paisaje volcánico con numerosos conos y *spatters* con lineamientos volcánicos orientados al NE-SO y edades que abarcan del Pleistoceno al Holoceno. Con 22 centros eruptivos, representa al dominio con mayor número de pequeños edificios volcánicos monogenéticos de composición intermedia a máfica. Por su parte el dominio conos de Tanimireche, con un número mucho menor de centros volcánicos, se encuentra alineado en dirección ENE-OSO, paralelo al Sistema de Fallas Morelia-Acambay. En el caso del dominio La Alberca, este contiene al único aparato volcánico de erupción freatomagmática en la región, el *maar* La Alberca de Guadalupe o de Teremendo, como lo han llamado diferentes autores (Kshirsagar *et al.*, 2015; Soria-Caballero *et al.*, 2019 y 2021). Por último, el dominio volcanes de Pátzcuaro-Tzintzuntzan muestra una alternancia temporal y geomorfológica de aparatos volcánicos, con volcanes tipo escudo, domos y conos

cineríticos, incluyendo a los dos edificios más jóvenes de la región, el cono Los Lobos y el volcán en escudo El Frijol, de 6015 y 3230 a AP, respectivamente (Osorio-Ocampo *et al.*, 2018).

10.3 El patrimonio geológico y los sitios de geodiversidad: un recurso natural no valorado

Desde el enfoque de la geoconservación, la geodiversidad volcánica y de paisajes es un recurso para el desarrollo local y sustentable que no había sido examinado anteriormente en la región. Se puede reconocer que la región cuenta con patrimonio geológico y potenciales sitios de geodiversidad. De acuerdo con la metodología propuesta por Brilha (2016) los criterios para identificar el patrimonio geológico o geositios son representatividad, integridad, rareza y conocimiento científico. Los sitios Los Piloncillos en el subdominio mesas El Porvenir y La Alberca en el dominio La Alberca son considerados patrimonio geológico (geositios) ya que cumplen con estos cuatro criterios (Figura 54 y 55).

El primero está conformado por geoformas erosivas no renovables (cárcavas) de depósitos volcánicos de caída del Pleistoceno (depósitos piroclásticos El Porvenir). Este depósito se expone de manera ejemplar al suroeste de la localidad El Porvenir, en un sitio al que localmente han denominado *Los Piloncillos*. Este paisaje es representativo ya que ilustra de manera ejemplar un proceso volcánico y erosivo; tiene integridad ya que se encuentra en buen estado de conservación y cuenta con un valor científico, lo cual es denotado por las investigaciones científicas realizadas en torno a este (Gómez-Arango, 2019; Avellán *et al.*, 2020). Es oportuno mencionar que el Geoparque de la Mixteca Alta (Palacio Prieto, 2015) tiene como principal elemento de geodiversidad un paisaje similar al de las cárcavas de *Los Piloncillos*. Además, este evento del Pleistoceno representa de manera educativa y científica una erupción de tipo pliniana y de composición riolítica, haciéndola, por su composición química y explosividad, un evento excepcional (rareza) en el contexto geológico del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985 y 1987).

En el caso de La Alberca, es un sitio en buen estado de conservación y se considera representativo, ya que tiene el potencial de ilustrar un proceso eruptivo de tipo freatomagmático, el cual es inusual en la región, ya que su formación implica condiciones hidrológicas y magmáticas específicas. Este tipo de geoformas volcánicas representa tan solo

el 3% de los aparatos monogenéticos en toda la Faja Volcánica Transmexicana (Siebe y Salinas, 2014, en Kshirsagar *et al.*, 2015). Ambos sitios pueden ser considerados patrimonio geológico con potencial turístico (geoturismo) y educativo. Un proyecto de geoconservación en estos sitios implicaría una evaluación de riesgo a degradación que condicione su gestión y favorezca el desarrollo económico local y a su vez cumpla con el objetivo de conservar.



Figura 54. El *maar* La Alberca, al noreste de Teremendo de los Reyes.

Por otro lado, a partir de los conceptos de Brilha (2016), son considerados sitios de geodiversidad aquellos sitios que presentan un mayor potencial turístico y educativo que un valor científico excepcional. En el caso de potencial turístico, los criterios evaluados son escenario y potencial interpretativo, mientras que para el potencial educativo son evaluados el potencial didáctico y la diversidad geológica, y en ambos casos se evalúan los criterios de accesibilidad y seguridad.

En este sentido, en la región se pueden considerar potenciales sitios de geodiversidad el C. El Tzirate, C. La Nieve, C. Tetillas, C. Quinceo y C. El Águila. Todos estos se encuentran en el sector occidental del área de estudio y representan voluminosos y/o elevados edificios volcánicos relacionados al CVMG. Todos estos cumplen con el criterio de escenario y potencial interpretativo, ya que al ser importantes cimas permiten la observación de la geodiversidad volcánica y de paisajes de la región desde múltiples ángulos.



Figura 55. Cárcavas de depósitos de caída volcánica del Pleistoceno al sur de El Porvenir, en el sitio denominado *Los Piloncillos*.

Sin embargo, es oportuno señalar que en estos últimos sitios deberían ser examinados con un mayor detalle los criterios de potencial educativo, accesibilidad y seguridad, para poder definir sitios específicos que cumplan con estos objetivos. En el caso de diversidad geológica, estos edificios volcánicos suelen caracterizarse por presentar una homogeneidad litológica en donde predominan los derrames de lava, por lo que múltiples elementos de geodiversidad en un mismo sitio deberían ser mejor evaluados. Estas consideraciones se encuentran fuera del alcance de este estudio, pero su análisis detallado podría llevar a la delimitación de geosenderos que conecten sitios clave de interés geológico y/o geomorfológico. Una característica que destaca en estos sitios es que se localizan cerca de importantes centros de población como Morelia, Quiroga, Pátzcuaro y Acuitzio del Canje, lo cual es ventajoso para la accesibilidad y el desarrollo de proyectos orientados al geoturismo y la educación de las geociencias

En relación con la geodiversidad asociada con las Áreas Naturales Protegidas de la región, se puede mencionar que en la porción este y sureste de la región se concentran todas las ANP's. Es una de las zonas con mayor biodiversidad de la región y es representada por un paisaje de sierra dominado por geformas volcánicas del Oligoceno-Mioceno (domos erosionados y paleo-calderas), altamente dislocado y erosionado, compuesto principalmente

por una sucesión de derrames de lava andesítico-dacíticos e ignimbritas. Destaca la belleza visual del paisaje de sierra (escenario) de este sector, sin embargo, por sus condiciones actuales de escasa accesibilidad, podría no representar un patrimonio de geodiversidad tan evidente como el que se destaca en el sector occidente de la región. Existen elementos geológicos atractivos (sitios de geodiversidad) como cascadas (Figura 56) y pozas termales que podrían ser propuestos y evaluados por su potencial geoturístico y educativo. Por lo tanto, es fundamental contar con la localización de estos elementos geológicos enclavados en la Sierra de Mil Cumbres para así poder establecer diferentes rutas, miradores, geosenderos y su relación con otras formas de patrimonio (biológico, cultural e histórico), siendo sin duda el biológico el de mayor notoriedad. Esto último implica un análisis que rebasa los alcances de este trabajo.

Otros sitios saltan a la vista en la valoración de las oportunidades de desarrollo local basado en la geodiversidad, p. ej. el volcán El Melón, un cono cinerítico con una morfología joven bien conservada que colinda con la riqueza cultural de la localidad de Capula, o los volcanes de Rancho Seco, también conos cineríticos cuyos derrames lávicos sustentan la base del sitio arqueológico de Angamuco (Ramírez-Uribe *et al.*, 2019). También se han reconocido cuevas de lava en Quiroga (C. Hueco) y Tiristarán con limitada actividad turística.

En suma, a partir de este análisis preliminar se sugiere que la Región de Morelia puede ser bien identificada por una amplia geodiversidad de paisaje construido desde hace más de 30 millones de años y caracterizado por una geodiversidad de paisaje volcánico, asociado con el emplazamiento heterogéneo que representa un alto valor educativo, cultural y científico.

En particular, los sitios Los Piloncillos y La Alberca deben ser considerados patrimonio geológico ya que cumplen con los criterios definidos (Brilha, 2016). Estos sitios deben ser valorados y es necesario evaluar su riesgo a degradación para así poder establecer planes de manejo que permitan conservar su estructura.

La geoconservación es una estrategia de desarrollo territorial que busca integrar las diferentes formas de patrimonio geológico, biológico, histórico y cultural de las regiones para impulsar el desarrollo local a partir de un uso racional y sustentable de sus recursos con estrategias como el geoturismo y los geoparques (Dowling, 2010). A diferencia del tradicional enfoque biocentrista de la conservación, las estrategias de geoconservación son de carácter holístico.

En consecuencia, es necesario integrar inventarios del patrimonio biológico, histórico y cultural que acompañen la valoración del patrimonio geológico y potenciales sitios de geodiversidad para que sea completada la evaluación integral (holística) que propone la geoconservación y se cumpla con sus objetivos, los cuales ya han sido aplicados y probados recientemente en México (Comarca Minera y Mixteca Alta) y se han desarrollado con éxito desde hace más de dos décadas en otras partes del mundo, principalmente en Europa y Asia (Reynard y Brilha, 2018).

Por último, es relevante mencionar que el patrimonio geológico y los sitios de geodiversidad de la Región de Morelia, y como suele suceder en otras regiones, se encuentran localizados en zonas rurales, que representa una oportunidad para valorar su territorio y diversificar las formas de desarrollo económico local en zonas que son usualmente marginadas.

10.4 La perspectiva holística de la geoconservación en el manejo de las Áreas Naturales Protegidas de la Región de Morelia

La Región de Morelia cuenta con 14 Áreas Naturales Protegidas de administración estatal y federal, las cuales se concentran en el sector sureste de la región. De estas 14 ANP's, 4 han sido decretadas como Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación (ADVC), por lo que su manejo está en función de sus legítimos propietarios (Arcos de la Cascada, El Tocuz, Tsintsani y Uakusi) (LGEEPA, 2021). A excepción del área protegida federal denominada Insurgente José María Morelos, las nueve áreas restantes son administradas por el gobierno estatal. Estas últimas son: cañadas del río Chiquito, Cerro Punhuato, ex escuela agrícola denominada La Huerta, fideicomiso de la ciudad industrial de Morelia, Instituto Tecnológico Agropecuario No. 7, loma de Santa María y depresiones aledañas, manantial La Mintzita, parque Francisco Zarco y Pico Azul-La Escalera. Para las áreas protegidas estatales, 4 cuentan con programas de manejo publicados en el periódico oficial del estado de Michoacán y para otras dos se han publicado programas de manejo por parte de la extinta Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente (SUMA). El área protegida federal Insurgente José María Morelos y el ANP más extensa de la región, Pico Azul-La Escalera, no cuentan con programa de manejo. La eficiencia en la aplicación de los planes de manejo correspondientes es excluyente del análisis de este trabajo.

En México, la legislación ambiental actual no contempla la protección del patrimonio geológico y la geodiversidad (Palacio-Prieto 2015). Esto es consecuencia del enfoque tendencialmente biocéntrico de la conservación de la naturaleza, el cual ha sido perpetuado y transmitido en todo el mundo. Sin embargo, la bioconservación no implica una conservación integral, ya que la degradación de los factores abióticos de un ecosistema impacta directamente en la degradación de su biodiversidad (Sharples, 2002; Palacio-Prieto, 2015). Tras la Cumbre de la Tierra llevada a cabo en Río de Janeiro en 1992, el término biodiversidad adquirió gran publicidad y las estrategias de desarrollo sustentable fueron promovidas en todo el mundo (Simonian, 1999). Se anticipó que dado el éxito relativo que tuvo el término biodiversidad, la geodiversidad atraería entusiasmo hacia los sistemas geológicos (Gray, 2005). Desde la década de los ochentas, las estrategias de la geoconservación, así como su conceptualización se ha ido consolidando con un marcado progreso en su aplicación en Europa y Asia, donde se encuentran la mayoría de los geoparques globales de la UNESCO y donde además cuentan con figuras legales y programas gubernamentales específicamente dirigidos a la conservación de la geodiversidad (Reynard y Brilha, 2018; Brilha, 2018; Global Geoparks Network, 2022).

En México, las Áreas Naturales Protegidas son figuras que han privilegiado, como en muchos otros países, la protección del componente biótico de los ecosistemas y aunque de manera implícita también a los componentes abióticos (incluyendo la geología y la geomorfología), este reconocimiento no es explícito en la legislación que las define y regula (Palacio-Prieto, 2015). Sin embargo, dada la vocación que tienen las áreas protegidas y la ausencia de legislación en torno a la protección de la geodiversidad y el geopatrimonio, estas constituyen un terreno fértil para su valoración (Palacio-Prieto, 2015). Además de ser una alternativa para enfrentar esta problemática, las Áreas Naturales Protegidas constituyen espacios privilegiados para la valoración conjunta del patrimonio biológico y geológico, brindando así una oportunidad ejemplar para valorar a los recursos naturales con una perspectiva holística.

Por otro lado, el hecho de que la atracción central de un sitio sean sus características geológicas no es una idea innovadora. Desde la declaración del primer parque nacional en el mundo, Yellowstone, la relevancia del componente geológico es evidente. En México, de acuerdo con una evaluación preliminar de 176 ANP's federales analizadas, en al menos 116

(66%) de ellas se ubican rasgos geológicos y geomorfológicos relevantes que constituyen un patrimonio que cuenta con atributos para ser reconocido, evaluado e incorporado dentro de la oferta de las ANP's en cuestión (Palacio-Prieto, 2015).

En este sentido, la explícita protección a la geodiversidad por medio de figuras legales concretas y el aprovechamiento de la teoría desarrollada y aplicada en diversos escenarios del mundo bajo esquemas de geoconservación son tareas primordiales para el desarrollo de la geoconservación en México, en donde las Áreas Naturales Protegidas pueden desempeñar una función central. En este contexto, es recomendable realizar inventarios de geopatrimonio y sitios de geodiversidad ubicados en las Áreas Naturales Protegidas de la región, para de esta manera ampliar, valorar y proteger su patrimonio de manera integral. Asimismo, se busca brindar más elementos para promover la protección de estas áreas de gran valor ambiental, que anteriormente ya han sido transgredidas por la presión que ejerce la expansión urbana, y ofrecer alternativas de desarrollo local económico que beneficie a los habitantes de las localidades ubicadas dentro de estas áreas por medio de actividades basadas en el geoturismo y la educación de las geociencias.



Figura 56. Cascada de Los Filtros, al sureste de Morelia, parte del sistema hidrológico de la microcuenca del río Chiquito.

10.5 El conocimiento geológico y la estrategia de geoconservación, una clave para la prevención y contingencia de los peligros naturales de la Región de Morelia

El escenario de problemáticas geológico-ambientales de la región, particularmente en la ciudad de Morelia, está ligado a un desarrollo territorial carente de perspectiva geológica y ambiental, acentuado por los peligros naturales que caracterizan a la región.

Inicialmente, la ciudad fue establecida de manera armónica con el paisaje y sus aptitudes. De acuerdo con Vargas-Uribe (2014), se pueden definir dos etapas en la urbanización de Morelia, la primera y más larga (1541-1960), caracterizada por la expansión ordenada de una ciudad que mantenía un proyecto de traza urbana ortogonal y la segunda caracterizada por una traza urbana que refleja territorialmente, no un proyecto de ciudad, sino los intereses particulares, tanto de los especuladores urbanos legalmente conformados, como de los fraccionadores irregulares.

A pesar de los programas de desarrollo urbano que son actualizados a la par de los periódicos cambios de administración, en donde se analiza el medio físico sobre el cual se expande la mancha urbana, en la realidad y más allá de meros trámites burocráticos, los problemas de inundaciones (Arreygue-Rocha *et al.*, 2005; Hernández y Vieyra, 2005), la ubicación inadecuada de tiraderos de basura (Israde-Alcántara *et al.*, 2005), los procesos de remoción en masa (Arreygue-Rocha *et al.*, 2002; Hernández-Madriral *et al.*, 2004; Pola-Villaseñor *et al.*, 2006), la subsidencia del terreno asociada a la sobreexplotación de los mantos acuíferos y el fallamiento geológico (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006) y la invasión y en algunos casos desaparición de los polígonos de Áreas Naturales Protegidas (Sánchez-Sepúlveda y Urquijo-Ortiz, 2010; Ávila-García, 2010) parecen ser más elocuentes con respecto al manejo actual del territorio que los extensísimos programas de desarrollo urbano.

De acuerdo con Hernández y Vieyra (2010), la fuerte dinámica demográfica y la presión que esta ha generado en la ocupación de nuevos espacios en la periferia de la ciudad, reflejan las debilidades de los planes de desarrollo urbano que no han sido capaces de frenar la expansión de los límites de la ciudad y estiman que esta situación continuará durante los próximos 20 años.

Ante este panorama de indiferencia y desconocimiento generalizado hacia los sistemas geológicos, por parte de los tomadores de decisiones como de la población en general, la divulgación de la geología a través de las estrategias de geoconservación representa una alternativa para la concientización.

De acuerdo con Carcavilla (2007), este desconocimiento provoca que los gestores del territorio presten poca atención hacia un medio que, en muchos casos, es desconocido y que en consecuencia no es demandado por los visitantes, y en la población en general, esta ausencia de interés provoca una escasa presión social y una aún menor demanda de recursos interpretativos de la geología. El potencial educativo y turístico de las estrategias de geoconservación permite llevar el conocimiento geológico a un público amplio por medio de la valorización del patrimonio geológico y la geodiversidad y a su vez, se pretende crear conciencia en torno a los peligros naturales asociados a los sistemas geológicos. Aunque, se debe advertir que, el conocimiento de elementos geológicos de interés, en algunos casos (como ha sucedido en España), puede provocar una importante degradación de los mismos, por lo tanto, la divulgación debe ser un proceso pensado dentro de un plan global de gestión (Carcavilla, 2007).



Figura 57. Fotografía panorámica tomada desde el sureste de Morelia. Al fondo se observan los edificios volcánicos del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, zona occidental de la región.

XI. CONCLUSIONES

1. Los recursos geológicos, geomorfológicos y de patrimonio tangible e intangible de la Región de Morelia nunca han sido evaluados bajo la perspectiva de geoconservación, desaprovechando un recurso tangible e intangible que podría detonar el desarrollo social con una estrategia de geoturismo adecuada. Sin embargo, la presencia de estos recursos sí ha tenido consecuencias importantes en la incidencia de fenómenos y gestión de riesgo geológico. En este trabajo se analizó la geodiversidad de la Región de Morelia como una propuesta para evaluar su patrimonio geológico desde una perspectiva del paisaje, la geología y la geoconservación.
2. Se determinaron un total de 216 centros volcánicos, de los cuales 72 fueron clasificados como conos cineríticos, 28 *spatters*, 1 *maar*, 61 domos, 11 escudos, 3 paleo-calderas y 40 domos erosionados. Los edificios volcánicos clasificados como cono cinerítico, spatter, maar, domo y escudo se distribuyen mayormente en todo el sector occidental de área de estudio y se relacionan espacio-temporalmente con los productos de la Faja Volcánica Transmexicana, con edades menores a ~8 Ma.
- 3.- Las unidades de paisaje dominadas por paleo-calderas y domos erosionados se distribuyen en el sector oriental y corresponden al vulcanismo miocénico de la región (con algunas edades del Oligoceno), con edades mayores a 16 Ma. También cabe destacar que, se propone por primera vez la ubicación de una paleo-caldera, al sureste de la región y este de la localidad Puerto La Sosa, de la cual toma su nombre la unidad Ignimbrita Puerto La Sosa, anteriormente cartografiada, fechada y brevemente descrita (Pasquaré *et al.*, 1991).
4. Se sintetiza la cronología de los eventos geológicos registrados la Región de Morelia, donde la actividad volcánica más antigua (Oligoceno-Mioceno), dominada por vastos derrames de lava de composición intermedia y vulcanismo de tipo silíceo explosivo asociado a la Sierra Madre Occidental, cesó hace ~16 Ma a la par de un sistema tectónico distensivo con dirección NNO-SSE a NO-SE. Posteriormente, la actividad magmática se reanudó después de un hiatus de ~8 Ma con la erupción del volcán Zapata. Este vulcanismo

reemergente es acompañado por un nuevo régimen de esfuerzos transtensivo con dirección NE-SO, relacionado a la deformación intra-arco de la Faja Volcánica Transmexicana, y el cual propició la formación de antiguas zonas de sedimentación fluvio-lacustre que se exponen al este de la región.

5. La actividad del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato inició a finales del Plioceno (3.8 Ma) con una moderada e intermitente actividad volcánica de edificios monogenéticos concentrados en el sector suroeste y dominada por geoformas de domos, seguida por un profuso y continuo vulcanismo que se desarrolló del Pleistoceno al Holoceno (2 Ma-3200 a AP), representado por una diversidad de geoformas volcánicas típicas del campo volcánico (domos, conos cineríticos, spatters, escudos y maar), lo cual modificó completamente el paisaje de todo el sector occidental de la región.

6. Se identificaron y definieron 18 dominios de paisaje, diferenciados entre sí por características geológicas y geomorfológicas distintivas configuradas por procesos morfogenéticos particulares, los cuales han sido principalmente procesos volcánicos y tectónicos de deformación frágil desde hace más de 30 Ma. Estas regiones de paisaje representan un elemento *per se* de la geodiversidad de paisaje y por lo tanto un elemento de geoconservación y geoturismo que merecería continuar por medio de la descripción de geositios, geosenderos y de elementos de alto valor cultural y de biodiversidad.

7. Se reconoció que la región cuenta con patrimonio geológico y sitios potenciales de geodiversidad volcánica y de paisaje. Se valoró de manera sobresaliente a los geositios Los Piloncillos, al sur de la localidad El Porvenir, y La Alberca, al noreste de Teremendo de los Reyes, los cuales, por su valor científico, turístico y educativo, cumplen con criterios para ser considerados patrimonio geológico (geositios), que con el desarrollo de estrategias de geoconservación pueden ofrecer alternativas de desarrollo local económico en zonas rurales del municipio de Morelia.

8. Se considera que es oportuno realizar inventarios detallados de geopatrimonio y sitios de geodiversidad ubicados en las ANP's como propuesta para una valoración y manejo integral del patrimonio biológico y geológico de la Región de Morelia. En este contexto, resalta por su amplia extensión y belleza escénica el área protegida Pico Azul-La Escalera, ubicada en

el dominio de paisaje más antiguo de la región, caracterizado por un paisaje de sierra y en el cual resaltan elementos geológicos como sus cascadas y pozas termales.

9. Se propone que, ante el panorama de indiferencia y desconocimiento generalizado hacia los sistemas geológicos, por parte de los tomadores de decisiones como de la población en general, las problemáticas geológico-ambientales y la ineludible expansión urbana carente de perspectiva geológica, el conocimiento y la difusión de las características geológicas de la región a través de las estrategias de geoconservación, son una alternativa para la concientización.

XII. Bibliografía

- Arce, J. L., Macías, J. L., Rangel, E., Layer, P., Garduño-Monroy, V. H., Saucedo, R., García, F., Castro, R. y Pérez-Esquivias, H., Late Pleistocene rhyolitic explosive vulcanism at Los Azufres Volcanic Field, central Mexico: Geological Society of America, Field Guide, 25, 45-82.
- Arreygue, R. E., 1999, Le condizioni di pericolosità idrogeologica nella città di Morelia, Michoacan (Messico): Università degli studi di Perugia, tesis de doctorado. 171 pp.
- Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V. H., Canuti, P., Casaglie, N., Iotti, A. y Chiesa, S., 2002, Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 19 (2), 91-106.
- Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V. H., Canuti, P., Casaglie, N. y Iotti, A., 2004, Inundaciones históricas y potenciales en la ciudad de Morelia relacionadas con el río chiquito, en Garduño-Monroy (ed.), Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 225-240.
- Arreygue-Rocha, E., Gómez, N. P., Negrete, C. C. e Ibarra, J. A., 2012, Estudio de las inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán, México: Revista de Geología aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 103-110.
- Avellán, D. R., Cisneros-Máximo, G., Macías, J. L., Gómez-Vasconcelos, M. G., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G. y Robles-Camacho, J., 2020, Eruptive chronology of monogenetic volcanoes northwestern of Morelia- Insights into volcano-tectonic interactions in the central-eastern Michoacán Guanajuato Volcanic Field, México: Journal of South American Earth Sciences, 100, 23 pp.
- Ávila, P., 2014, Urbanización, poder local y conflictos ambientales en Morelia, en Vieyra y Larrazábal (eds.), Urbanización, Sociedad y Ambiente, experiencias en ciudades medias: Morelia, Michoacán, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 121-149.
- Ávila-Olivera, J. A., and V. H. Garduño-Monroy, 2006, Hundimientos ocasionados por Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF) en la Ciudad de Morelia, Mich., México: Geotermia 19 (2), 50-59.
- Ávila-Olivera, J. A., and V. H. Garduño-Monroy, 2008, A GPR study of subsidence-creep-fault process in Morelia, Michoacán, Mexico: Engineering Geology, 100, 69-81.
- Ávila-Olivera, J.A., 2008, Evolución de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla, casos: Morelia, Michoacán y Celaya, Guanajuato: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, tesis doctoral, 232 pp.
- Ban, M., Hasenaka, T., Delgado-Granados, H., Takaoka, T., 1992, K-Ar ages of lavas from shield volcanoes in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, México: Geofísica Internacional, 31, 467-473.

- Blatter, D. y Hammersley, L., 2010, Impact of the Orozco Fracture Zone on the central Mexican Volcanic Belt: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197, 67-84.
- Brilha, J., 2005, Património Geológico e Geoconservação, a Conservação da Natureza na sua Vertente Geológica: Palimage Editores, Viseu.
- Brilha, J., 2016, Inventory and quantitative assessment of geosites and geodiversity sites: a review: *Geoheritage*, 8 (2), 119-134.
- Brilha, 2018, *Geoheritage and Geoparks*, en Reynard, E. y Brilha, J. (eds.), *Geoheritage*: Elsevier, 223-335.
- Brocx, M. y Semeniuk, V., 2007, *Geoheritage and conservation – history, definition, scope and scale*: *Journal of the Royal Society of Western Australia*, 90, 53-87.
- Buenrostro O., Bocco G. y Bernache G., 2001, Urban solid waste generation and disposal in Mexico. A case study: *Waste Management and Research*, 19, 169-176.
- Buenrostro, O., Israde, I., 2003, La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del lago de Cuitzeo, México: *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(4), 161-169.
- Campa, M.F., Coney, P.J., 1983, Tectono-stratigraphic terranes and mineral resource distributions in Mexico: *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20 (6), 1040-1051.
- Cantagrel, J. M. y Robin, C., 1979, K-Ar dating of Eastern Mexican volcanic rocks – Relation between the andesitic and the alkaline provinces: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5, 99-114.
- Cañón-Tapia, E., Reappraisal of the significance of volcanic Fields: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 310, 26-38.
- Carcavilla, L., 2007, Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación y relación con los espacios Naturales protegidos: Instituto Geológico y Minero de España, 360 pp.
- Cardona Melchor, S., 2015, Estudio vulcanológico del Complejo Volcánico El Águila y los domos La Taza-La Nieve-El Burro, centro-norte de Michoacán: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría, 121 pp.
- Cerca Martínez, L. M., Aguirre Díaz, G. J. y López Martínez, M., 2000, The geologic evolution of the southern Sierra de Guanajuato, México: a documented example of the transition from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt: *International Geology Review*, 42, 131-151.
- Cisneros-Máximo, G., 2015, Estudio geológico-geomorfológico de los volcanes Tetillas- Quinceo. Propuesta de cartografía Jerárquica: Universidad Nacional autónoma de México, tesis de maestría, 150 pp.
- Connor, C.B., 1987. Structure of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33 (1–3), 191–200.

- Connor C., 1990, Cinder cone clustering in the Transmexican Volcanic Belt: Implications for structural and petrologic models: *Journal of Geophysics Research*, 95, 19395-19405.
- Congreso de los Estados Unidos Mexicanos (18 de enero de 2021), Ley General para el Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA): *Diario Oficial de la Federación*, 138 pp.
- Cram, S., Galicia, L. e Israde-Alcantara, I. (eds.), 2010, Atlas de la Cuenca del lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental: Morelia, Michoacán, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 311 pp.
- Di Tragial, F., Morelli, S., Casagli, N. y Garduño-Monroy, V. H., 2014, Semi-automatic delimitation of volcanic edifice boundaries: Validation and application to the cinder cones of the Tancítaro-Nueva Italia region (Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, México): *Geomorphology*, 219, 152-160.
- Dixon, G., 1995, Aspects of geoconservation in Tasmania: a preliminary review of significant Earth features: Hobart, Tasmania, report to the Australian Heritage Commission, Parks and Wildlife Service, 32.
- Dowling, R., 2010, Geotourism's Global Growth: *Geoheritage*, 3, 1-13.
- Espinosa Ortiz, F., Vieyra, A. y Garibay Orozco, C., 2015, Narrativas sobre el lugar. Habitar una vivienda de interés social en la periferia urbana: *Revista invi*, 84 (30), 59-86.
- Espinosa-Rodriguez, 2017, Geoparque en el Distrito Minero Tlalpujahua-El Oro: *CienciaUAT*, 11 (2), 24-45.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V. y Manea, M., The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the México subduction zone: *Tectonophysics*, 522-523, 122-149.
- Foshag, W. F., y Gonzalez, R. J., 1956, Birth and development of Parícutin Volcano, México: *U.S. Geological Survey Bulletin*, 965d, 355-489.
- García, E. CONABIO. Climas (Clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000,000. México, 1998.
- García-Sánchez, L. A., 2020, El paisaje como unidad de análisis para caracterizar y valorar el patrimonio geológico y los sitios de geodiversidad de interés para el geoturismo en el distrito minero de Tlalpujahua-El Oro-DIMITO: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de doctorado, 193.
- García-Quintana, A., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Cervantes-Solano, M., Osorio-Ocampo, S., Macías, J.L., Urrutia-Fucugauchi, J., 2016, Magnetic dating of volcanic rocks formed during the Holocene: Case of lava flows around Pátzcuaro Lake (Michoacán-Guanajuato volcanic field): *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 33 (2), 209-220.
- Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., Chiesa, S., Israde, A. I., Rodriguez, 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*, 1 (5), 3-12.

- Garduño-Monroy, V. H., Corona-Chávez, P., Israde-Alcantara, I. y Mennella, L., Arreygue, E., Bigioggero, B. y Chiesa, S., 1999a, Carta geológica de Michoacán, 1:250,000, Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo, 111 p.
- Garduño-Monroy, V. H., Rodríguez-Torres, G. M., Israde-Alcantara, I., Arreygue, E., Canuti, P. y Chiesa, S., 1999b, Efectos del clima (El Niño) en los fenómenos de Fluencia de las fallas geológicas de la Ciudad de Morelia: *Geos*, 19 (2), 84-93.
- Garduño-Monroy, V. H., Rocha, E., Israde-Alcántara, I. y Torres, G., 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*, 18 (1), 37-54.
- Garduño-Monroy, V. H., 2004, Contribuciones a la geología e impacto ambiental de la Región de Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, 276 pp.
- Garduño-Monroy, V. H., Pérez-López, R., Israde-Alcantara, I., Rodríguez-Pascua, M. A., Szyuka-ruk, E., Hernández-Madrigal, V. M., García-Zepeda, M. L., Corona-Chávez, P., Ostroumov, M., Medina-Vega, V. H., García-Estrada, G., Carranza, O., López-Granados, E. y Mora Chaparro, J. C., 2009, Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico: *Geofísica Internacional*, 48 (3), 319-335.
- Geoparque Comarca Minera, 2022, [<https://geoparquecomarcaminera.mx/>: octubre de 2022].
- Geoparque Mixteca Alta, 2022, [<https://geoparquemixtecaalta.org/>: octubre de 2022].
- Gómez-Arango, J., 2019, Estratigrafía y dinámica eruptiva de la secuencia de erupciones plinianas al noroeste de Morelia, Michoacán: Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 120 pp.
- Gómez-Calderón, D. A., 2018, Relación morfológica y estructural del vulcanismo mono/poligenético en la porción sureste del Campo Volcánica Michoacán-Guanajuato: Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura, 167 pp.
- Gómez-Calderón, D. A., 2021, Coexistencia de magmas shoshoníticos y calcialcalinos en la Región Volcánica Graben del Cahulote de Santa Ana – Pedernales, Michoacán, México. Petrografía, geoquímica e implicaciones tectónicas: Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 136 pp.
- Gómez-Vasconcelos, M. G., Garduño-Monroy, V. H., Macías, J. L., Layer, P. L. y Benowitz, J. A., 015, The Sierra de Mil Cumbres, Michoacán México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental and the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 128-147.
- Guilbaud, M. N., Siebe, C., Layer, P., Salinas, S., Castro-Govea, R., Garduño-Monroy, V. H. y Le Corvec, N., 2011, Geology, geochronology, and tectonic setting of the Jorullo Volcano región, Michoacán, México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201, 97-112.

- Guilbaud, M. N., Siebe, C., Layer, P. y Salinas, S., 2012, Reconstruction of the volcanic history of the Tacámbaro-Puruarán área (Michoacán, México) reveals high frequency of Holocene monogenetic eruptions: *Bulletin of volcanology*, 74, 1187-1211.
- Guilbaud, M. N., Siebe, C., Rasoazanamparany, C., Widom, E., Salinas, S., Castro Govea, R., 2019, Petrographic, Geochemical and Isotopic (Sr–Nd–Pb–Os) Study of Plio-Quaternary Volcanics and the Tertiary Basement in the Jorullo-Tacámbaro Area, Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, Mexico: *Journal of Petrology*, 60 (12), 2317–2338.
- Gray, M., 2005, Geodiversity and Geoconservation: What, Why and how? *The George Wright Forum*, 22, 4-12.
- Gray, M., 2013, *Geodiversity. Valuing and conserving abiotic nature*: Wiley-Blackwell, 512 pp.
- Gray, M., 2018, Geodiversity: the backbone of geoheritage and geoconservation, en Reynard, E. y Brilha, J. (eds.), *Geoheritage*: Elsevier, 13-25.
- Hasenaka, T. y Carmichael, I. S. E., 1985, The cinder cones of Michoacan-Guanajuato central Mexico: their age, volumen and distribution, and magma discharge rate: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 105-124.
- Hasenaka, T. y Carmichael, I. S. E., 1987, The Cinder Cones of Michoacan-Guanajuato, Central Mexico: *Petrology and Chemistry: Journal of Petrology*, 28 (2), 241-269.
- Hasenaka, T., 1994, Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacan-Guanajuato volcanic field, Central Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, 13-31.
- Hernández, J. y Vieyra, A., 2010, Riesgos por inundaciones en asentamientos precarios del periurbano. Morelia, una ciudad media mexicana. ¿El desastre nace o se hace?: *Revista de Geografía Norte Grande*, 45-62.
- Hernández-Bernal, M. S., Corona-Chávez, P., Solís-Pichardo, G., Schaaf, P., Solé-Viñas, J. y Molina, J. F., 2015, Miocene andesitic lavas of Sierra de Angangueo: a petrological, geochemical, and geochronological approach to arc magmatism in Central México: *International Geology Review*, 58 (5), 603-625.
- Hernández-Bernal, M. S., Corona-Cávez, P., Trujillo-Hernández, N., Macías-Romo, C., Morán-Zenteno, D. J., Jiménez-Haro, A. y Poli, S., The Cuitzeo granitic xenolith: evidence of an Early Miocene magma plumbing system in central Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38 (1), 29-42.
- Hernández-Madrigal, V. M., 2001, Caracterización y estudio de las arcillas y estudio geomorfológico del movimiento en masa de San Miguel del Monte, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, tesis de maestría, 95 pp.

- Hernández-Madrigal, V. M., Garduño-Monroy, V. H. y Ostroumov, M., 2004, Caracterización del proceso de remoción en masa de San Miguel del Monte, Morelia, Mich., en Garduño-Monroy (ed.), *Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 199-224.
- Hernández-Madrigal, V. M., Garduño-Monroy, V. H. y Ávila-Olivera, J. A., 2011, Atlas de peligros geológicos de la ciudad de Morelia, Mich.: estandarización del documento, actualización cartográfica de fallas geológicas de la zona urbana, y evaluación de tasas de hundimiento: Morelia, Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, H. Ayuntamiento de Morelia, Mich., 50 pp.
- Instituto Municipal de Planeación de Morelia (IMPLAN), 2020, Programa Municipal de Desarrollo Urbano Morelia 2020-2040: H. Ayuntamiento de Morelia, Michoacán, México.
- Israde-Alcantara, I., 1995, Bacini lacustri del settore centrale dell'Arco Vulcanico Messicano: Stratigrafia ed evoluzione sedimentaria basata sulle diatomee: Università degli Studi di Milano, Italia, tesis de doctorado, 254 pp.
- Israde-Alcantara, I. y Garduño-Monroy, V. H., 1999, Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting. The evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system, (Central Western Michoacán, Mexico): *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 15 (1-3), 209-227.
- Israde Alcantara, I., Garduño Monroy, V. H., 2004, La geología de la región de Morelia, en Garduño-Monroy (ed.), *Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 1-13.
- Israde-Alcantara I., Buenrostro Delgado, O. y Carrillo Chávez, A., 2005, Geological Characterization and Environmental Implications of the Placement of the Morelia Dump, Michoacán, Central Mexico: *Journal of the Air and Waste Management Association*, 55(6), 755-764.
- Israde-Alcantara, I., Buenrostro-Delgado, O., Garduño-Monroy, V. H., Hernández-Madrigal, V. M. y López-Granados, E., 2009, Problemática geológico-ambiental de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, norte del estado de Michoacán: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 60 (2), 203-211.
- Jácome-Paz, M., 2019, Two new geothermal prospects in the Mexican Volcanic Belt: La Escalera and Agua Caliente – Tzitzio geothermal springs, Michoacán, México: *Geothermics*, 80, 40-55.
- Johnson, C. A. y Harrison, C. G. A., 1990, Neotectonics in central México: *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64, 187-210.
- Kiernan, K., 1996, *The Conservation of Glacial Landforms: Hobart, Tasmania*, Forest Practices Unit.
- Kshirsagar, P., Siebe, C., Guilbaud, M. N., Salinas, S. y Layer, P. W., 2015, Late pleistocene Alberca de Guadalupe maar volcano (Zacapu basin, Michoacán): Stratigraphy, tectonic setting and paleo-hydrogeological environment: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 214-236.

- López-Granados, E., Bocco, G. y Mendoza Cantú, M. E., 2001, Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia: Boletín del Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 45, 56-76.
- Losantos, E., Cebriá, J. M., Morán-Zenteno, D. J., Martiny, B. M., López-Ruiz, J. y Solís-Pichardo, J.J., 2017, Petrogenesis of the alkaline and calcalkaline monogenetic volcanism in the northern sector of the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (Central México): Lithos, 288, 295-310.
- Luhr, J. F. y Carmichael, I.S.E., 1985, Jorullo Volcano, Michoacán, México (1759-1774): The earliest stages of fractionation in calc-alkaline magmas: Contributions to minerology and petrology, 90, 142-161.
- Mahgoub, A. N., Reyes-Guzmán, N., Böhnell, H., Siebe, C., Pereira, G. y Dorison, A., 2017, Paleomagnetic constraints on the ages of the Holocene Malpaís de Zacapu lava Flow eruptions, Michoacán (México): Implications for archeology and volcanic hazards: The Holocene, 1-17.
- 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, 9 (1), 33-50.
- Mauvois, R., 1977, Cabalgamiento Miocénico en la parte centromeridional de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, 1 (1), 48-63.
- Mazzarini, F., Ferrari, L., Isola, I., 2012, Self-similar clustering of cinder cones and crust thickness in the Michoacán-Guanajuato and Sierra de Chichinautzin volcanic fields, Trans-mexican Volcanic Belt. Tectonophysics, 486, 55-64.
- Melo, C., 2002, Áreas naturales protegidas de México en el siglo XX: Mexico, D. F., Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 156 pp.
- Menella, L., Garduño-Monroy, V. H., Giner Robles, J. L., Liotta, D., Brogi, A., 2022, Definición del campo de esfuerzos-deformación y sismotectónica del sistema de fallas Morelia-Acambay: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 39 (1), 82-99.
- Newsome D. y Dowling, R., 2010, Geotourism: the tourism of geology and landscape: Oxford, England, Goodfellow Publishers.
- Newsome, D. y Dowling, R., 2018, Geoheritage and Geotourism, en Reynard, E. y Brilha, J. (eds.), Geoheritage: Elsevier, 305-321.
- Nixon, G. T., Demant, A., Armstrong, R. L. y Harakal, J. E., 1987, K-Ar and geologic data bearing on the age and evolution of the Trans-Mexican Volcanic Belt: Geofísica Internacional, 26 (1), 109-158.
- Olvera-García, E., Garduño-Monroy, V. H., Ostrooumov, M., Bermejo-Santoyo, G., Guevara-Alday, J. A., Brogi, A. y Liotta, D., 2020a, Litofacies y mineralogía de los depósitos de sínter de la zona geotérmica

- de San Agustín del Maíz, Michoacán, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37 (3), 212-223.
- Olvera-García, E., Garduño-Monroy, V. H., Liotta, D., Brogi, A., Bermejo-Santoyo, G. y Guevara-Alday, J. A., 2020b, Neogene-Quaternary normal and transfer faults controlling Deep-seated geothermal systems: The case of San Agustín del Maíz (central Trans-Mexican Volcanic Belt, México): *Geothermics*, 86, 101791.
- Orozco-Ramírez, Q., 2022, Guía de actividades escolares de campo en el Geoparque Mixteca Alta: Ciudad de México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía.
- Osorio-Ocampo, L. S., 2014, Evolución espacio temporal del vulcanismo alrededor del lago de Pátzcuaro: Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, tesis de maestría, 100 pp.
- Osorio-Ocampo, S., Macías, J. L., Pola, A., Cardona-Melchor, S., Sosa Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H., Layer, P., García-Sánchez, L., Perton, M. y Benowitz, J., 2018, The eruptive history of the Pátzcuaro Lake area in the Michoacán Guanajuato Volcanic Field, central México: Field mapping, C-14 and $40\text{Ar}/39\text{Ar}$ geochronology: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, 307-328.
- Ownby, S., Lange, R. A., Hall, C. M., Delgado-Granados, H., 2011, Origin of andesite in the Deep crust and eruption rates in the Tancítaro-Nueva Italia región of the central Mexican arc: *Geological Society of America Bulletin*, 123(1-2), 274-294
- Palacio-Prieto, J. L., 2013, Geositos, geomorfositos y geoparques: importancia, situación actual y perspectivas en México: *Investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México*, 82, 24-37.
- Palacio-Prieto, J. L., 2015, La valoración y promoción del patrimonio geológico y geomorfológico en Áreas Naturales Protegidas; una propuesta para México, en Moncada-Maya y López-López (eds.), 70 años del Instituto de Geografía, historia, actualidad y perspectiva: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 98-115.
- Palacio-Prieto, J. L., Gaitan-Morán, J. y Sahagún-Becerra, Y., 2016, México, en Palacio-Prieto et al. (eds.), Patrimonio geológico y su conservación en América Latina, situación y perspectivas nacionales: Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 191-215.
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V. H., Tibaldi, A. y Vezzoli, L., 1991, Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacán, México: Geological Society of America, Map and Chart series, MCH072, 22 pp.
- Pérez Esquivias, H., Macías Vázquez, J.L., Garduño Monroy, V.H., Arce Saldaña, J.L., García Tenorio, F., Castro Govea, R., Hernández, R., 2010, Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.: *Geotermia*, 23 (2), 51-63.

- Pérez-López, R., Legrand, D., Garduño-Monroy, V. H., Rodríguez-Pascua, M. A. y Giner-Robles, J. L., 2011, Scaling Laws of the size-distribution of monogenetic volcanoes within the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (México): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201, 65-72.
- Pérez-Orozco, J.D., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V.H., Avellán, D.R., 2018, Felsic-intermediate magmatism and brittle deformation in Sierra del Tzirate (Michoacán-Guanajuato Volcanic Field): *Journal of South American Earth Sciences*, 85, 81–96.
- Pola-Villaseñor, A., Garduño-Monroy, V. H., Díaz-Salgado, C., y Hernández-Madrigal, V. M., 2006, Estudio geotécnico asociado a procesos de remoción en masa del parque Francisco Zarco (Ocolusen), Morelia (Michoacán, México): *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58 (2), 183-193.
- Pola, A., Martínez-Martínez, J., Macías, J. L., Fusi, N., Crosta, G., Garduño-Monroy, V. H. y Núñez-Hurtado, J. A., 2016, Geomechanical characterization of the Miocene Cuitzeo ignimbrites, Michoacán, Central Mexico: *Engineering Geology*, 214, 79-93.
- ProGeo, 2021, History of ProGeo, [<http://www.progeo.ngo/history.html>: septiembre de 2021]
- Ramírez-Uribe, I., Siebe, C., Salinas, S., Guilbaud, M. N., Layer, P. y Benowitz, J., 2019, ¹⁴C and ⁴⁰Ar/³⁹Ar radiometric dating and geologic setting of Young lavas of Rancho Seco and Mazcuta volcanoes hosting archaeological sites at the margins of the Pátzcuaro and Zacapu lake basins (central Michoacán, México): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 388, 106674.
- Ramírez-Uribe, I., Siebe, C., Oryiaëlle Chevrel, M. y Fisher, C., 2021, Rancho Seco monogenetic volcano (Michoacán, México): Petrogenesis and lava Flow emplacement based on LiDAR images: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 411, 107169.
- Reyes-Guzmán, N., Siebe, C., Oryaëlle Chevrel, M., Guilbaud, M. N., Salinas, S. y Layer, P., 2018, Geology and radiometric dating of Quaternary monogenetic volcanism in the westerns Zacapu lacustrine basin (Michoacán, México): implications for archeology and future Hazard evaluations: *Bulletin of Volcanology*, 80.
- Reynard, E. y Brilha, J., 2018, Geoheritage: a multidisciplinary and applied research topic, en Reynard, E. y Brilha, J. (eds.), *Geoheritage*: Elsevier, 3-9.
- Sánchez-Sepúlveda, H. U. y Urquijo Torres, P. S., 2014, La Expansión urbana en el suroriente de Morelia. Una revisión histórico-ambiental, 1885-2010, en Vieyra y Larrazábal (eds.), *Urbanización, Sociedad y Ambiente, experiencias en ciudades medias: Morelia, Michoacán*, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 13-45.
- Sharples, C., 1993, A methodology for the identification of significant landforms and geological sites for geoconservation purposes: Hobart, Tasmania, Forestry Commission.
- Sharples, C., 2002, *Concepts and Principles of Geoconservation: Tansmanian Parks and Wildlife Service Website*, 79 pp.

- Siebe, C., Guilbaud, M.-N., Salinas, S., Kshirsagar, P., Chevrel, M.O., De la Fuente, J.R., Hernández-Jiménez, A., Godínez, L., 2014. Monogenetic volcanism of the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field: Maar craters of the Zacapu basin and domes, shields, and scoria cones of the Tarascan highlands (Paracho-Paricutin region). Fieldguide for the pre-meeting fieldtrip (Nov 13–17) of the 5th International Maar Conference (SIMC-IAVCEI). Impretei, Ciudad de México, Querétaro, México, 1–33.
- Silva-Mora, L., 1979, Contribution a la connaissance de l'Áxe Volcanique Transmexicain- étude géologique et petrologique des lavas du Michoacan oriental: Marseille, Univerité du Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, tesis de doctorado, 230 pp.
- Simkin, T., Siebert, L., McClelland, L., Bridge, D., Newhall, C., y Latter, J. H., 1981, Volcanoes of the world: Hutchinson Ross, Stroudsburg, PA., 232 pp.
- Simonian, L., 1999, La defensa de la tierra del jaguar. Una historia de la conservación en México: Mexico, D. F., Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto Nacional de Ecología, 345 pp.
- Soria-Caballero, D. C., 2019, Evidence for quaternary seismic activity of the La Alberca-Teremendo fault, Morelia region, Trans-Mexican Volcanic Belt: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36(2), 242-258.
- Soria-Caballero, D. C., Gómez-Calderón, D. A. y Garduño-Monroy, V. H., 2021, Análisis paleosísmico de la falla El Malpaso – El Salto, norte de Michoacán, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73 (2), A181220.
- 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. The Venta del Bravo fault: *Journal of Geophysical Research*, 97 (B8), 11983-11994.
- 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*, 14 (5), 1245-1262.
- Suter, M., López-Martinez, M., Quintero-Legorreta, O. y Carrillo-Martinez, M., 2001, Quaternary intra-arc extensión in the central Trans-Mexican volcanic belt: *GSA Bulletin*, 113 (6), 693-703.
- Suter, A., 2016, Structure and Holocene rupture on the Morelia Fault, Trans-Mexican Volcanic Belt, and Their Significance for Seismic-Hazard Assessment: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (5), 12 pp.
- Trujillo-Hernández, N., 2017, Estudio geológico, geoquímico y mineralógico de las secuencias volcánicas de la porción suroeste del Lago de Cuitzeo, Michoacán, ligadas a la zona geotérmica de San Agustín del Maíz: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, tesis de maestría, 110 pp.

- Trujillo-Hernández, N., Garduño-Monroy, V. H., Jiménez-Haro, A., Gómez-Álvarez, F., Nájera-Blas, S. M., Israde-Alcantara, I. y Layer, P., 2022, Estratigrafía volcánica de la porción suroeste del Lago de Cuitzeo y su relación con la formación de la caldera tipo graben de Chucándiro: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 39 (1), 100-115.
- UNESCO, 2021a, UNESCO Global Geoparks (UGGp), [<https://en.unesco.org/global-geoparks>: septiembre de 2021].
- UNESCO, 2021b, List of Geoparks & Regional Networks, [<https://en.unesco.org/global-geoparks/list>): septiembre de 2021].
- Vargas-Uribe, G., 2014, Del proyecto de ciudad a la ciudad sin proyecto: el desarrollo histórico territorial de la traza urbana de la ciudad de Valladolid-Morelia 1541-2009, en Vieyra y Larrazábal (eds.), *Urbanización, Sociedad y Ambiente, experiencias en ciudades medias: Morelia, Michoacán, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental*, 13-45.
- Villaseñor, L., 2005, La Biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 266 pp.
- Williams, H., 1950, Volcanoes of the Paricutin región, México: U.S. Geological Survey Bulletin, 965b, 165-279.
- Woo, K., 2017, Role of IUCN WCPA Geoheritage Specialist Group for geoheritage conservation and recognition of World Heritage sites, *Global Geoparks and other protected areas: Geophysical Research Abstracts*, 19, p.1137.
- Zwolinski, Z., Najwer, A. y Giardino, M., 2018, Methods for assesing Geodiversity, en Reynard, E. y Brilha, J. (eds.), *Geoheritage: Elsevier*, 27-52

ANEXO 1. MARCO TEÓRICO: ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS

Índice	
1. Introducción	157
2. El surgimiento del conservacionismo moderno internacional	157
3. Áreas Naturales Protegidas en México	160
4. Marco legislativo de las Áreas Naturales Protegidas de administración federal	164
5. Áreas Naturales Protegidas en Michoacán: legislación estatal y municipal	169
6. Bibliografía	170

1. Introducción

Las Áreas Naturales Protegidas son estrategias que forman parte de las políticas ambientales de todo el mundo. En un sentido amplio, en México, las Áreas Naturales Protegidas son superficies definidas que por decreto tienen el propósito de conservar sus recursos naturales por medio de estrategias de manejo orientadas al desarrollo sostenible. Sin embargo, el concepto de Área Natural Protegida y sus formas de aplicación ha transitado por diferentes etapas. A continuación, se presenta un breve esbozo de sus orígenes, evolución y funcionamiento.

2. El surgimiento del conservacionismo moderno internacional

En los anales de la humanidad se ha difuminado el evento que ilustre a quien o quienes pertenece el mérito de haber fundado la primera reserva natural del mundo, pero si se puede precisar donde y cuando se formalizó el primer Parque Nacional. Este tuvo lugar en la región de Yellowstone, al noroeste de Estados Unidos, una región enmarcada por la actividad volcánica y sus impresionantes manifestaciones geotérmicas. Yellowstone fue declarado oficialmente el primer Parque Nacional del mundo en 1872 (Melo, 2002). Posteriormente el concepto se trasladó a Canadá (1885), Nueva Zelanda (1894), Sudáfrica y Australia (1898),

y a Latinoamérica, en México (1898) con la creación de la Reserva Forestal de El Chico, ahora Parque Nacional (Miller, 1980, en Melo, 2002). Sin embargo, Melo (2002) también menciona que el antecedente oficial relacionado con las Áreas Naturales Protegidas en México se da en 1876 con la declaratoria de la Reserva Nacional Forestal Desierto de los Leones, en la ciudad de México.

Mediante una reseña histórica del origen y desarrollo de las Áreas Naturales Protegidas en el mundo y en México realizada por Melo (2002), se logran detectar algunos eventos clave que han definido el escenario mundial con respecto a las ANP's. En 1948 durante la reunión de Fontainebleau, Francia, se crea la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), organización considerada actualmente como la autoridad mundial sobre el estado del mundo natural y las medidas necesarias para salvaguardarlo, esta cuenta con más de 1300 organizaciones miembro y los aportes de más de 18.000 expertos (UICN, 2021). En 1958 la UICN crea el Comité Provisorio de Parques Nacionales, actual Comisión Mundial de áreas protegidas. En 1962 se realiza el primer congreso mundial de parques nacionales de la UICN, que se realiza aproximadamente cada diez años, celebrado en Estados Unidos (1962 y 1972), Indonesia (1982), Venezuela (1992), Sudáfrica (2003), Australia (2014), durante los cuales se han impulsado diversas estrategias para la conservación y el manejo de las ANP's en el mundo.

De acuerdo con Melo (2002), en 1962, en el marco del primer congreso mundial de la UICN, se detectó que existían diferentes definiciones para las ANP's, adquiriendo características propias en cada país. La UICN intentó homogeneizar esas diferencias y en 1994 concluyen con la adopción de una definición propia y una categorización de los diferentes tipos de áreas naturales protegidas que se resumen en la tabla 1 con una definición y el tipo de manejo al que fueron destinadas (Tabla 1).

Tabla 3. Categorías de manejo de Áreas Naturales Protegidas adoptadas por la UICN en 1994 (modificado de Melo, 2002).

CATEGORÍA		DEFINICIÓN	TIPO DE MANEJO
I. ÁREAS DE PROTECCIÓN ESTRICTA	a. Reserva natural estricta	Área terrestre y marina con ecosistemas únicos o representativos, rasgos geológicos, y/o especies	Actividades de investigación científica

	b. Área silvestre	Amplia superficie terrestre y marina sin modificar o poco transformada que se maneja para mantener sus condiciones originales	Protección del medio silvestre
II. PARQUE NACIONAL		Área terrestre y marina que protege la integridad de los ecosistemas para la presente y futuras generaciones, donde se excluye la explotación u ocupación hostil y ofrece al visitante un espacio para actos científicos, espirituales educativos y recreativos.	Protección del ecosistema y turismo
III. MONUMENTO NATURAL		Área con características naturales y culturales de singular valor por su inherente rareza, calidad estética o significado cultural	Conservación de rasgos naturales especiales
IV. ÁREA DE MANEJO DE HABITATS Y ESPECIES		Área terrestre y marina sujeta a intervención humana conforme a los propósitos de manejo, para mantener los hábitats y satisfacer requerimientos de especies particulares	Conservación a través de un manejo dirigido
V. PAISAJE PROTEGIDO TERRESTRE-MARINO		Área costera-marina donde la armónica interacción hombre-naturaleza, se traduce en lugar distintivo con valor estético y cultural, y a menudo con alta biodiversidad.	Conservación y recreación del paisaje
VI. ÁREA PROTEGIDA CON MANEJO DE RECURSOS		Área con sistemas naturales poco modificados, cuyo manejo garantiza a largo plazo la protección de la biodiversidad, y a la vez, suministra productos naturales y servicios que satisfacen necesidades de la población residente.	Uso sostenible de recursos naturales

La definición adoptada en 1994 por la UICN para definir Área Natural Protegida es la siguiente:

Área terrestre o marina especialmente dedicada a la protección y mantenimiento de la diversidad biológica, así como a la protección de los recursos culturales, naturales y asociados, y que sea manejada mediante vías jurídicas u otras instancias eficaces (UICN, 1994).

Se establecieron 9 propósitos básicos para el manejo de las Áreas Naturales Protegidas:

1. Investigación científica
2. Protección del paisaje silvestre

3. Preservación de especies y la diversidad genética
4. Mantenimiento de servicios ambientales
5. Protección de características culturales y naturales específicas
6. Turismo y recreación
7. Educación
8. Uso sostenible de los recursos de los ecosistemas naturales
9. Mantenimiento de atributos culturales y tradicionales

Las directrices de manejo de ANP's que publica y recomienda la UICN en 1994 enfatizan que las categorías deben ser definidas en función de los objetivos del manejo y no en función del título del área o de la efectividad de manejo con la cual se alcanzan los objetivos. En otras palabras, la categorización de ANP debe ser definida principalmente a partir de los objetivos que se desean lograr con su manejo, y estos objetivos deben ser compatibles con las metas y necesidades nacionales, locales o privadas (o una mezcla de las tres). Recomiendan también la aplicación de objetivos principales, secundarios y potencialmente aplicables, creando así una posible combinación de objetivos para el área. Actualmente este sistema de categorización realizado hace más de 25 años sigue siendo aceptado por organizaciones internacionales y gobiernos nacionales como el punto de referencia para la clasificación de las ANP's (UICN, 2021).

3. Áreas Naturales Protegidas en México

Las evidencias de una actitud proteccionista hacia los recursos naturales, en México se remontan al siglo XV cuando el poeta Nezahualcóyotl fundó el primer jardín botánico sobre el cerro Tetzocotzingo, en el Estado de México, actualmente Parque Nacional Molino de Flores. Poco después el emperador Moctezuma Xocoyotzin estableció numerosas áreas verdes, incluyendo el bosque de Chapultepec (Lastra, 1975, en Melo, 2002).

En 1917, influenciado por Miguel Ángel Quevedo, apodado el amigo del árbol, el presidente Venustiano Carranza declara el primer Parque Nacional de México, Desierto de los Leones, en la ciudad de México (Vargas, 1984, en Simonian, 1999). Las Áreas Naturales Protegidas vuelven a tener relevancia hasta la llegada a la presidencia de Lázaro Cárdenas. Durante el periodo de 1934-1940 Cárdenas le dio un gran impulso a las ANP's. Convirtió a la conservación de los recursos naturales en una de las más importantes prioridades de su administración (Simonian, 1999). Este último autor, relata como Cárdenas habría confesado a Quevedo su arrepentimiento por haber perjudicado a Michoacán como gobernador, por su

ignorancia acerca de la conservación muchos de sus bosques fueron talados y sus manantiales secados, y no deseaba, ahora como presidente, perjudicar a todo el país. Durante su mandato se crearon en total 40 ANP's, cuando antes solo se tenían dos, El Desierto de los Leones, en la ciudad de México y Mineral del Chico, en el estado de Hidalgo. Cabe destacar que el mayor énfasis que tenía la conservación por medio de las ANP's estaba centrado en los recursos forestales.

Para México, el periodo postcardenista de 1940-1970, fue un periodo oscuro para la conservación de la naturaleza. Simonian (1999) lo resumen muy bien en el siguiente texto:

¿Qué tipo de políticas de conservación salieron de un período en el que una de las más altas prioridades del gobierno era proporcionar recursos naturales para el desarrollo industrial?

No es de sorprender que la mayoría de los altos funcionarios pusieran poco énfasis en la conservación. Los presidentes mexicanos aún hablaban de esta necesidad, pero sus acciones generalmente desmentían sus palabras. Los programas de conservación no tenían suficientes fondos y las agencias en este sentido carecían de personal. Aunque el gobierno promulgó durante el periodo post-cardenista algunas enérgicas leyes sobre la materia, rara vez se iniciaban programas de conservación vigorosos. En una época en la que el objetivo principal del Estado era la rápida industrialización, la élite política no estaba dispuesta a hacer cumplir leyes que prohibían o restringían el uso de los recursos naturales (p. 138).

Durante la primera mitad del siglo XX, resaltan dos figuras que desde el más alto ámbito político apoyaron fuertemente el movimiento conservacionista, Miguel Ángel Quevedo y Lázaro Cárdenas. Además de ellos, de manera paralela y de alguna forma contraria, Simonian (1999) retrata a un personaje particular, Enrique Beltrán, biólogo mexicano reconocido como el primer biólogo de México, formado en la Universidad Nacional Autónoma de México y doctorado en Zoología por la Universidad de Columbia. Beltrán hablaba de conservación desde un punto de vista naturalmente científico, diferente al de Quevedo, que, aunque estaba también basado en ciencia, el de Enrique Beltrán se adelantaba al comprender de una manera más completa el funcionamiento de los ecosistemas por medio de la ecología. Quevedo, por

su parte, era ingeniero civil especializado en hidráulica formado en Europa, razón por la cual entendía y le daba gran relevancia al papel de los árboles en el ciclo del agua, la importancia que estos tenían para conservar los suelos, y por supuesto, para la agricultura.

A mediados de la década de 1940, Beltrán comenzó a hacer campaña para la creación de una organización para la conservación de los recursos naturales. Financiado por varios grupos, en 1952 crea el Instituto Mexicano de Recursos Naturales Renovables (IMERNAR). Se trata de la biblioteca más antigua de su clase, con una de las mejores colecciones sobre ecología y conservación en Latinoamérica (Simonnan, 1999). En ese paralelismo de un país cuyas políticas ambientales no lograban eficientemente sus objetivos de conservación, Enrique Beltrán se presentaba a la primera conferencia de la UICN (1962) sugiriendo que el conflicto entre preservación y uso podría ser evitado mediante un sistema de zonificación, siendo uno de los primeros que contribuyeron a las discusiones sobre la zonificación en las Áreas Naturales Protegidas, posteriormente convertido en el principal planteamiento para la protección (Simonian, 1999).

Melo (2002), tras realizar un breve esbozo del origen y desarrollo de las Áreas Naturales Protegidas en el México del siglo XX, concluye que:

...el gobierno federal y la sociedad mexicana, desde inicios del siglo XX hasta la década de los sesenta, interpretaron a la conservación como un concepto que implicaba establecer básicamente parques nacionales y algunas reservas forestales, política que soslayo conflictos de tenencia de tierra, actividades productivas locales, respaldo técnico y presupuestario, etc.; para finalmente en las últimas dos décadas del siglo anterior, arribar a otra nueva etapa, donde la conservación de los recursos naturales empezó a asumirse bajo la perspectiva de un desarrollo sustentable y con mayor rigor jurídico, institucional y apoyo financiero (p. 33).

Como lo menciona Melo (2002) en el párrafo anterior, la conservación de los recursos naturales empezó a asumirse bajo la perspectiva de un desarrollo sustentable, y esto fue acompañado de la creación de un marco jurídico más sólido e instituciones dedicadas al manejo de las Áreas Naturales Protegidas.

Varios autores coinciden en que, durante la década de los setenta, dos acontecimientos principales contribuyeron a que México se interesara de nuevo en la conservación y se retomaran las Áreas Naturales Protegidas como principal herramienta, se trata de la Conferencia de Naciones Unidas sobre el Medio Humano llevada a cabo en Estocolmo en 1972 y el inicio del programa El Hombre y la Biosfera por parte de la UNESCO. Como parte de este programa se crean las reservas de la biosfera, con el propósito de crear una alternativa distinta, pero no excluyente a los parques nacionales y similares (Halffter, 2011). Se trata de una alternativa que contempla la conservación de la biodiversidad, pero también las realidades económicas y sociales actuales, una alternativa que conjuga la conservación del patrimonio natural con desarrollo sustentable (Halffter, 2011).

Al respecto, Simonian (1999) menciona que las reservas de la biosfera fueron impulsadas como la principal herramienta para promover una nueva relación humano-medio ambiente, y estas contenían un núcleo para actividades científicas y de estabilidad ecológica, estrictamente protegidas, fuera de esa área los manejadores de los recursos animaban a la gente local para adoptar políticas económicas que fuesen menos perjudiciales para el medio ambiente. Gonzalo Halffter, crítico del entonces sistema de Parques Nacionales fue un elemento decisivo en la fundación de las primeras dos reservas de la biósfera en México, las reservas de Mapimi y Michilia, en el estado de Durango. Cabe destacar como este nuevo programa de reservas de la biósfera propone una zonificación del área además de una visión ecológica que contempla las interacciones y necesidades de la población local, ideas que anteriormente ya planteaba el doctor Enrique Beltrán.

Como se mencionó antes, el desarrollo sostenible vino acompañado de importantes cambios en la política ambiental mexicana. En 1988 se crea el Sistema Nacional de Áreas Naturales protegidas (SINANP) junto con la primera Ley General para el Equilibrio Ecológico y la Protección del Medio Ambiente (LGPEEPA), expedida el 28 de enero de 1988, siendo esta la principal legislación actual en la materia y la primera legislación ambiental que contempla a las Áreas Naturales Protegidas. El SINANP es administrado por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) que a su vez depende de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Por otro lado, la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA), creada en 1992, es el órgano encargado de procurar la justicia ambiental mediante la aplicación y cumplimiento de la legislación ambiental federal.

4. Marco legislativo de las Áreas Naturales Protegidas de administración federal

La LGPEEPA, en su texto vigente publicado el 18 de enero del 2021, establece en su artículo 44 sobre las áreas naturales protegidas que:

Las zonas del territorio nacional y aquellas sobre las que la Nación ejerce soberanía y jurisdicción, en las que los ambientes originales no han sido significativamente alterados por la actividad del ser humano, o que sus ecosistemas y funciones integrales requieren ser preservadas y restauradas, quedarán sujetas al régimen previsto en esta Ley y los demás ordenamientos aplicables (LGPEEPA, 2021).

En el artículo 45 se declara que el establecimiento de las áreas naturales protegidas tiene como objeto:

- I.- Preservar los ambientes naturales representativos de las diferentes regiones biogeográficas y ecológicas y de los ecosistemas más frágiles, así como sus funciones, para asegurar el equilibrio y la continuidad de los procesos evolutivos y ecológicos;
- II.- Salvaguardar la diversidad genética de las especies silvestres de las que depende la continuidad evolutiva; así como asegurar la preservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional, en particular preservar las especies que están en peligro de extinción, las amenazadas, las endémicas, las raras y las que se encuentran sujetas a protección especial;
- III.- Asegurar la preservación y el aprovechamiento sustentable de los ecosistemas, sus elementos, y sus funciones;
- IV. Proporcionar un campo propicio para la investigación científica y el estudio de los ecosistemas y su equilibrio;
- V.- Generar, rescatar y divulgar conocimientos, prácticas y tecnologías, tradicionales o nuevas que permitan la preservación y el aprovechamiento sustentable de la biodiversidad del territorio nacional;

VI. Proteger poblados, vías de comunicación, instalaciones industriales y aprovechamientos agrícolas, mediante zonas forestales en montañas donde se originen torrentes; el ciclo hidrológico en cuencas, así como las demás que tiendan a la protección de elementos circundantes con los que se relacione ecológicamente el área; y

VII.- Proteger los entornos naturales de zonas, monumentos y vestigios arqueológicos, históricos y artísticos, así como zonas turísticas, y otras áreas de importancia para la recreación, la cultura e identidad nacionales y de los pueblos indígenas.

(LGEEPA, 2021)

En el artículo 46 se consideran 9 tipos de áreas naturales protegidas: 1) Reservas de la Biosfera, 2) Parques Nacionales, 3) Monumentos Naturales, 4) Áreas de protección de recursos naturales, 5) Áreas de protección de flora y fauna, 6) Santuarios, 7) Parques y Reservas Estatales, así como las demás categorías que establezcan las legislaciones locales, 8) Zonas de conservación ecológica municipales, así como las demás categorías que establezcan las legislaciones locales, y 9) Áreas destinadas voluntariamente a la conservación. La número 7 y 8, como lo indican, no son de competencia de la federación (LGEEPA, 2021).

Al año 2020, el sistema federal de Áreas Naturales Protegidas está conformado por 182 ANP's con decreto federal, que abarcan una superficie total de 90,839,522 ha, de esta superficie total, el 23.6% corresponde a ecosistemas terrestres continentales, dulceacuícolas e insulares; y el 76.4%, a ecosistemas marinos. A estas categorías, se adicionan las 336 áreas destinadas voluntariamente a la conservación (ADVC) certificadas por la CONANP, que actualmente suman una superficie adicional de 505,918 ha (CONANP, 2020).

Tabla 4. Categorías de Áreas Naturales Protegidas y características (LGEEPA, 2021).

CATEGORÍAS	CARACTERÍSTICAS
RESERVA DE LA BIOSFERA	Área biogeográfica relevante a nivel nacional, representativa de uno o más ecosistemas no alterados o que requieren ser preservados y restaurados, en los cuales habiten especies representativas de la biodiversidad nacional (artículo 48).
PARQUES NACIONALES	Representaciones biogeográficas a nivel nacional, de uno más ecosistemas que se signifiquen por su belleza escénica, valor científico, educativo, de recreo, su valor histórico, por la existencia de flora y fauna, por su aptitud para el desarrollo del turismo, o bien por otras razones análogas de interés general (artículo 50).
MONUMENTOS NATURALES	Áreas que contengan uno o varios elementos naturales, consistentes en lugares u objetos naturales, que, por su carácter único o interés excepcional, interés estético, valor histórico o científico, se resuelva incorporar a un régimen de protección absoluta. No poseen la variedad de ecosistemas ni superficie necesaria para ser incluidas dentro de otras categorías de manejo (artículo 52).
ÁREAS DE PROTECCIÓN DE RECURSOS NATURALES	Aquellas destinadas a la preservación y protección del suelo, las cuencas hidrográficas, las aguas y en general los recursos naturales localizados en terrenos forestales de aptitud preferentemente forestal (artículo 53).
ÁREAS DE PROTECCIÓN DE LA FLORA Y LA FAUNA	Lugares que contienen los hábitats de cuyo equilibrio y preservación depende la existencia, transformación y desarrollo de las especies de flora y fauna silvestres (artículo 54).
SANTUARIO	Zonas caracterizadas por una considerable riqueza de flora o fauna, o por la presencia de especies, subespecies o hábitat de distribución restringida. Abarcan cañadas, vegas, grutas, cavernas, cenotes, caletas u otras unidades que requieran ser preservadas o protegidas (artículo 55).
ÁREAS DESTINADAS VOLUNTARIAMENTE A LA CONSERVACIÓN	Son aquellas que pueden presentar cualquiera de las características y elementos biológicos señaladas en el artículo 48 al 55 (que corresponden a las características señaladas para las demás categorías de ANP) (artículo 55 BIS).

En cuanto al manejo de las Áreas Naturales Protegidas, la LGEEPA en el artículo 65 establece que:

La Secretaría formulará, dentro del plazo de un año contado a partir de la publicación de la declaratoria respectiva en el Diario Oficial de la Federación, el programa de manejo del área natural protegida de que se trate, dando participación a los habitantes, propietarios y poseedores de los predios en ella incluidos, a las demás dependencias competentes, los gobiernos de las

entidades federativas, los Municipios y las demarcaciones territoriales de la Ciudad de México, en su caso, así como a organizaciones sociales, públicas o privadas, y demás personas interesadas.

(LGEEPA, 2021)

Este plan de manejo deberá contener, de manera general; la descripción de las características físicas, biológicas, sociales y culturales del área natural protegida; Las acciones a realizar a corto, mediano y largo plazo, estableciendo su vinculación con el Plan Nacional de Desarrollo; la forma en que se organizará la administración del área y los mecanismos de participación; los objetivos específicos del área natural protegida; la referencia a las normas oficiales mexicanas aplicables a todas y cada una de las actividades a que esté sujeta el área; los inventarios biológicos existentes y los que se prevea realizar y; las reglas de carácter administrativo a que se sujetarán las actividades que se desarrollen en el área protegida.

En el establecimiento, administración y manejo del Área Natural Protegida, la Secretaría deberá promover la participación de la comunidad local (artículo 47), lo cual el congruente con las recomendaciones internacionales para propiciar un desarrollo sustentable efectivo.

En el artículo 47 BIS se determina que en el Área Natural Protegida debe realizarse una división y subdivisión de zonas acorde con sus elementos biológicos, físicos y socioeconómicos para poder crear un plan de manejo que incluye una zona núcleo y una zona de amortiguamiento. También se menciona que se pueden establecer una o más zonas núcleo y de amortiguamiento (artículo 47 BIS 1). De manera general la zona núcleo corresponde a la zona de mayor protección y restricciones en la que su principal objetivo es la de preservar los ecosistemas y su funcionamiento mientras que la zona de amortiguamiento es una zona orientada al aprovechamiento por medio de prácticas de desarrollo sostenible. En la tabla 3 se nombran todas las subdivisiones establecidas para las zonas núcleo y de amortiguamiento, junto con algunas características y actividades permitidas de manera resumida.

Tabla 5. Zonas y subzonas que plantea la LGEEPA (2021) con características y actividades permitidas.

ZONA	SUBZONA	CARACTERÍSTICAS	ACTIVIDADES
I. ZONA NUCLEO	a) De protección	Superficie que ha sufrido poca alteración, ecosistemas relevantes o frágiles	Monitoreo del ambiente e investigaciones

			científicas no invasivas
	b) De uso restringido	Superficies en buen estado de conservación donde se busca mantener las condiciones actuales de los ecosistemas	Investigación científica no invasiva, monitoreo del ambiente, educación ambiental y turismo de bajo impacto
II. ZONA DE AMORTIGUAMIENTO	a) De preservación	Superficies en buen estado de conservación que contienen ecosistemas relevantes o frágiles	Investigación científica, monitoreo del ambiente, educación ambiental y actividades productivas de bajo impacto
	b) De uso tradicional	Superficies en donde los recursos naturales han sido aprovechados de manera tradicional y continua	Investigación científica, educación ambiental, turismo de bajo impacto y actividades de aprovechamiento usando técnicas tradicionales
	c) De aprovechamiento sustentable de los recursos naturales	Superficies en las que los recursos naturales pueden ser aprovechados bajo esquemas de aprovechamiento sustentable	Aprovechamiento, investigación científica, educación ambiental y turismo de bajo impacto
	d) De aprovechamiento sustentable de los ecosistemas	Superficies con usos agrícolas, pesqueros y pecuarios actuales	Aprovechamiento
	e) De aprovechamiento especial	Superficies generalmente de extensión reducida, con recursos naturales esenciales para el desarrollo social, y que deben ser explotadas sin deteriorar el ecosistema	Se podrán ejecutar obras públicas o privadas para la instalación de infraestructura o explotación de recursos naturales

	f) De uso público	Superficies que presentan atractivos naturales para la realización de actividades de recreación y esparcimiento	Construcción de instalaciones para el desarrollo de turismo, investigación científica, educación ambiental y monitoreo
	g) De asentamientos humanos	Superficie con asentamientos previos a la declaración de ANP	Asentamiento humano
	h) De aprovechamiento especial	Superficies en las que los recursos naturales han resultado severamente alterados o modificados	No deberán continuar las actividades que llevaron a dicha alteración.

5. Áreas Naturales Protegidas: legislación estatal y municipal

Como lo declara la LGEEPA (2021) en el artículo 46, los gobiernos estatales y municipales pueden establecer Áreas Naturales Protegidas en los términos que señale la legislación local. En la Ley para la Conservación y Sustentabilidad Ambiental del estado de Michoacán de Ocampo, en su texto vigente publicado el 5 de abril del 2021 se establecen las bases para la creación, vigilancia y protección de las Áreas Naturales Protegidas estatales. En este documento se declara que son autoridades ambientales en el estado, el Poder Ejecutivo del Estado, la Secretaría de Medio Ambiente, la Procuraduría de Protección al Ambiente y los Ayuntamientos del estado. En el artículo 80 se consideran 5 categorías generales:

1. Reservas Estatales
2. Parques Estatales
3. Zonas de Preservación Ecológica de los Centros de Población
4. Monumentos Naturales
5. Áreas Destinadas Voluntariamente a la Conservación Estatal.

Las reservas estatales tienen 4 subcategorías que corresponden a: a) naturales, b) refugio de flora y fauna, c) patrimoniales y d) captación y recarga de mantos acuíferos. Los parques estatales tienen dos subcategorías: a) naturales y b) urbanos ecológicos. De acuerdo con la Ley para la Conservación y Sustentabilidad Ambiental del estado de Michoacán de Ocampo:

Corresponde al Titular del Poder Ejecutivo del Estado la declaratoria y a la Secretaría la administración de las reservas y parques estatales, siendo competencia de los ayuntamientos la creación por acuerdo de Cabildo y la administración de las zonas de preservación ecológica de los centros de población (artículo 80).

En cuanto a la administración municipal de las Áreas Naturales Protegidas, el municipio de Morelia cuenta con el Reglamento Ambiental y de Protección al Patrimonio Natural publicado en el año 2012, los artículos 53 al 58 se refieren a las áreas protegidas ubicadas en el municipio.

6. BIBLIOGRAFÍA

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP), 2020, Programa Nacional de Áreas Naturales Protegidas 2020-2024: Ciudad de México, México, CONANP, 57 pp.

Congreso de los Estados Unidos Mexicanos (18 de enero de 2021), Ley General para el Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA): Diario Oficial de la Federación, 138 pp.

Congreso de Michoacán de Ocampo (5 de abril de 2021), Ley para la Conservación y Sustentabilidad Ambiental del Estado de Michoacán de Ocampo: Periódico Oficial del Estado, 105 pp.

H. Ayuntamiento Constitucional de Morelia, Michoacán (4 de julio de 2012), Reglamento Ambiental y de Protección al Patrimonio Natural del Municipio de Morelia, Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo, 20 pp.

Halffter, G., 2011, Reservas de la Biosfera: problemas y oportunidades en México: Acta Zoológica Mexicana, 28 (1), 177-189.

Melo, C., 2002, Áreas naturales protegidas de México en el siglo XX: Mexico, D. F., Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 156 pp.

- Simonian, L., 1999, La defensa de la tierra del jaguar. Una historia de la conservación en México: México, D. F., Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Instituto Nacional de Ecología, 345 pp.
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), 1994, Directrices para las categorías de manejo de áreas protegidas: Gland, Suiza y Cambridge, Reino Unido, Comisión de Parques Nacionales y Áreas Protegidas de la UICN, Centro Mundial de Monitoreo de la conservación, 261 pp.
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), 2021, Acerca de la UICN, recuperado de <https://www.iucn.org/es/acerca-de-la-uicn>.
- Unión Internacional para la conservación de la Naturaleza (UICN), 2021, Categorías de manejo de áreas protegidas de UICN, recuperado de <https://www.iucn.org/es/regiones/am%C3%A9rica-del-sur/nuestro-trabajo/%C3%A1reas-protegidas/categor%C3%ADas-de-manejo-de-%C3%A1reas-protegidas-de-uicn>.
- Villaseñor, L., 2005, La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 266 pp.

ANEXO 2. BIBLIOGRAFÍA TEMÁTICA DE LA GEOLOGÍA DE LA REGIÓN DE MORELIA

En este apartado de anexos se enlista una recopilación de referencias bibliográficas ordenadas por temas, los cuales corresponden a diferentes líneas de investigación desarrolladas en la Región de Morelia o relacionadas a su estudio regional. De manera general, las diferentes temáticas están asociadas a su estudio geológico y ambiental. Las referencias se encuentran ordenadas cronológicamente, lo cual permite observar los enfoques o evolución que las diferentes líneas de investigación han tomado en el transcurso del tiempo. Las temáticas que se presentan son: cambios de cobertura en la cuenca de Cuitzeo, Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato, cantera de Morelia, cartografía geológica, crecimiento urbano y manejo del territorio, estudios geológicos con enfoque en geotermia, estudios integrales de la cuenca de Cuitzeo, fallas geológicas y riesgo sísmico, problemática geológico-ambiental de la ubicación de tiraderos de basura, procesos de remoción en masa, riesgos hidrológicos, secuencias fluvio-lacustres, Sierra de Mil Cumbres, sistema de fallas Morelia-Acambay y sobreexplotación de acuíferos.

Cambios de cobertura en la cuenca de Cuitzeo

- Acosta, A., 2001, Cambio en los patrones de consumo de agua y cambio de uso de suelo. El caso de la cuenca del lago de Cuitzeo (1975–2000): Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo, Tesis de Licenciatura, 142 pp.
- López Granados, E.M., G. Bocco y M.E. Mendoza, 2001, Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo, en Mendoza, M.E., G. Bocco y E. López 2001. Regionalización ecológica, conservación de recursos naturales y ordenamiento territorial en la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán. Informe Técnico. Proyecto No. 98306024. Programa SIMORELOS–CONACYT, México, 273 pp.
- López-Granados, E., M. Mendoza y A. Acosta ,2002, Cambio de cobertura vegetal y uso de la tierra. El caso de la cuenca endorreica del lago de Cuitzeo, Michoacán: Gaceta Ecológica, 63 (en prensa).
- Mendoza Cantú, M. E., 2002, Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la cuenca del lago de Cuitzeo: D. F., México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de doctorado, 188 pp.
- Mendoza, M., Bocco, G., López Granados, E. y Bravo, M., 2002, Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca

cerrada del lago de Cuitzeo, Michoacán: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM, 49, 92-117.

Mendoza, M., López, E. y Bocco, G., 2004, Evaluación del efecto del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico de grandes cuencas. El caso de la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán, México, en Garduño-Monroy (ed.), Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 67-79.

Mendoza, M., López, E. y Bocco, G., 2004, Erosión en la cuenca de Cuitzeo. Un análisis espacial a nivel regional, en Garduño-Monroy (ed.), Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 80-88.

López-Granados, E., Mendoza-Cantú, M., Bocco, G. y Bravo-Espinosa, M., 2007, Patrones de degradación ambiental en la cuenca del lago de Cuitzeo, Michoacán, una perspectiva espacial, en Sanchez-Brito, C., Fragoso-Tirado, E. y Bravo-Espinoza, M. (eds.), Bases metodológicas para el manejo integrado de cuencas hidrológicas: INIFAP, 97-125.

Mendoza, M., Bocco, G. y López-Granados, E., 2007, Tendencias recientes de las superficies ocupadas por el lago de Cuitzeo. Un enfoque basado en percepción remota, sistemas de información geográfica y análisis estadístico: Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, 64, 43-62.

Mendoza, M.E., Bocco, G., López, E. y Bravo, M., 2010, Hydrological implications of land-cover and land-use change: Spatial analytical approach at regional scale in the closed basin of the Cuitzeo Lake, Michoacán, Mexico: Singapore Tropical Geography, 31, 197-214.

Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato

Hasenaka, T. y Carmichael, I. S. E., 1985, The cinder cones of Michoacan-Guanajuato central Mexico: their age, volumen and distribution, and magma discharge rate: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 25, 105-124.

Hasenaka, T. y Carmichael, I. S. E., 1987, The Cinder Cones of Michoacan-Guanajuato, Central Mexico: Petrology and Chemistry: Journal of Petrology, 28 (2), 241-269.

Connor, C.B., 1987. Structure of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Mexico: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 33 (1-3), 191-200.

Connor C., 1990, Cinder cone clustering in the Transmexican Volcanic Belt: Implications for structural and petrologic models: Journal of Geophysics Research, 95, 19395-19405.

Ban, M., Hasenaka, T., Delgado-Granados, H., Takaoka, T., 1992, K-Ar ages of lavas from shield volcanoes in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, México: Geofísica Internacional, 31, 467-473.

- Hasenaka, T., 1994, Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacan-Guanajuato volcanic field, Central Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, 13-31.
- Corona-Chávez, P., Reyes-Salas, M., Garduño-Monroy, V. H., Israde-Alcántara, Lozano-Santa Cruz, R., Morton-Bermea, O., y Hernández-Álvarez, E., 2006, Asimilación de xenolitos graníticos en el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato: El caso de Arocútn Michoacán, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23, 233-245.
- Mazzarini, F., Ferrari, L., Isola, I., 2010. Self-similar clustering of cinder cones and crust thickness in the Michoacan-Guanajuato and Sierra de Chichinautzin volcanic fields, Trans-Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics* 486 (1-4), 55–64.
- Pérez-López, R., Legrand, D., Garduño-Monroy, V.H., Rodríguez-Pascua, M.A., Giner-Robles, J.L., 2011, Scaling laws of the size-distribution of monogenetic volcanoes within the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (Mexico): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201 (1–4), 65–72.
- Siebe, C., Guilbaud, M.N., Salinas, S., Chedeville-Monzo, C., 2012. Eruption of Alberca de los Espinos tuff cone causes transgression of Zacapu lake ca. 25,000 yr BP in Michoacán, Mexico. 4IMC Conference, Auckland, NZ. *Geoscience Society of New Zealand Miscellaneous Publication 131A*, pp. 74–75 Abstract.
- Siebe, C., Guilbaud, M-N., Salinas, S., Layer, P.W., 2013. Comparison of the volcanic geology of the Tacámbaro-Puruarán (arc front) and the Zacapu (arc inland) areas in the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Mexico. IAVCEI 2013 Scientific Assembly, July 20-24. Kagoshima,
- Di Tragial, F., Morelli, S., Casagli, N. y Garduño-Monroy, V. H., 2014, Semi-automatic delimitation of volcanic edifice boundaries: Validation and application to the cinder cones of the Tancítaro-Nueva Italia region (Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, México): *Geomorphology*, 219, 152-160.
- Siebe, C., Salinas, S., 2014. Distribution of monogenetic phreato-magmatic volcanoes (maars, tuff-cones, tuff-rings) in the Mexican Volcanic Belt and their tectonic and hydrogeologic environment. IAVCEI-5IMC-Conference, Querétaro, Mexico.
- Siebe, C., Guilbaud, M.-N., Salinas, S., Kshirsagar, P., Chevrel, M.O., De la Fuente, J.R., Hernández-Jiménez, A., Godínez, L., 2014. Monogenetic volcanism of the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field: Maar craters of the Zacapu basin and domes, shields, and scoria cones of the Tarascan highlands (Paracho-Paricutin region). Fieldguide for the pre-meeting fieldtrip (Nov. 13–17) of the 5th International Maar Conference (5IMC-IAVCEI). Impretei, Ciudad de México, Querétaro, México, 1–33.
- Osorio-Ocampo, S., 2014. Evolución espacio-temporal del vulcanismo alrededor del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría, 100 pp.

- Pola, A., Macías, J.L., Osorio-Ocampo, S., Garduño-Monroy, V.H., Cardona-Melchor, S., 2014. Successive collapses of El Estribo Volcanic Complex in the Pátzcuaro Lake, Michoacán, Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 289, 41–50.
- Pola, A., Macías, J.L., Osorio-Ocampo, S., Garduño-Monroy, V.H., Cardona-Melchor, S., 2014. Successive collapses of El Estribo Volcanic Complex in the Pátzcuaro Lake, Michoacán, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289, 41–50.
- Gómez-Vasconcelos, G., 2015, La caldera de Villa Madero: vulcanismo explosivo del cuaternario en el borde sureste del Campo Volcánico Michoacán Guanajuato: *Ciencia Nicolaíta*, 65.
- Kshirsagar, P., Siebe, C., Guilbaud, M. N., Salinas, S. y Layer, P. W., 2015, Late pleistocene Alberca de Guadalupe maar volcano (Zacapu basin, Michoacán): Stratigraphy, tectonic setting and paleo-hydrogeological environment: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 214-236.
- Pola, A., Macías, J.L., Osorio-Ocampo, S., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V.H., y Martínez-Martínez, J., 2015, El Estribo Volcanic Complex: Evolution from a shield volcano to a cinder cone, Pátzcuaro Lake, Michoacán, México: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 303, 130-145.
- Cisneros-Máximo, G., 2015, Estudio geológico-geomorfológico de los volcanes Tetillas- Quinceo. Propuesta de cartografía Jerárquica: Universidad Nacional autónoma de México, tesis de maestría, 150 pp.
- Cardona Melchor, S., 2015, Estudio vulcanológico del Complejo Volcánico El Águila y los domos La Taza-La Nieve-El Burro, centro-norte de Michoacán: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría, 121 pp.
- Pérez-Orozco, J.D., 2015, Origen y evolución del magmatismo félsico en el Campo Volcánico Michoacán–Guanajuato. Región Tzirate: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría, 82 pp.
- García-Quintana, A., Goguitchaichvili, A., Morales, J., Cervantes-Solano, M., Osorio-Ocampo, S., Macías, J.L., Urrutia-Fucugauchi, J., 2016. Magnetic dating of volcanic rocks formed during the Holocene: Case of lava flows around Pátzcuaro Lake (Michoacán-Guanajuato volcanic field). *Rev. Mex. Ciencias Geol.* 33.
- Mahgoub, A., Reyes-Guzmán, N., Böhnell, H., Siebe, C., Pereira, G., Dorison, A., 2017, Paleomagnetic constraints on the ages of the Holocene Malpaís de Zacapu lava flow eruptions, Michoacán (México): Implications for archeology and volcanic hazards: *The Holocene*, 28 (2), 229-245.
- Pérez-Orozco, J.D., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V.H., Avellán, D.R., 2018, Felsic-intermediate magmatism and brittle deformation in Sierra del Tzirate (Michoacán-Guanajuato Volcanic Field): *Journal of South American Earth Sciences*, 85, 81–96.
- Osorio-Ocampo, S., Macías, J. L., Pola, A., Cardona-Melchor, S., Sosa -Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H., Layer, P., García-Sanchez, L., Pertom, M. y Benowitz, J., 2018, The eruptive history of the Pátzcuaro

Lake area in the Michoacán Guanajuato Volcanic Field, central México: Field mapping, C-14 and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Gómez-Arango, J. A., 2019, Estratigrafía y dinámica eruptiva de la secuencia de erupciones plinianas al noroeste de Morelia, Michoacán: Morelia, Michoacán, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 120 pp.

Ramírez-Uribe, I., Siebe, C., Salinas, S., Guilbaud, M., Layer, P. y Benowitz, J., 2019, ^{314}C and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ radiometric dating and geologic setting of young lavas of Rancho Seco and Mazcuta volcanoes hosting archaeological sites at the margins of the Pátzcuaro and Zacapu lake basins (central Michoacán, Mexico): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.

Avellán, D. R., Cisneros-Máximo, G., Macías, J. L., Gómez-Vasconcelos, M. G., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G. y Robles-Camacho, J., 2020, Eruptive chronology of monogenetic volcanoes northwestern of Morelia- Insights into volcano-tectonic interactions in the central-eastern Michoacán Guanajuato Volcanic Field, México: *Journal of South American Earth Sciences*, 100, 23 pp.

Gómez-Vasconcelos, M.G., Macías, J.L., Avellán, D.R., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, G.M., Cisneros-Máximo, G., Layer, P.W., Benowitz, J., López-Loera, H., Mendiola López, F., Pertón, M., 2020, The control of pre-existing faults on the distribution, morphology and volume of monogenetic volcanism in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field: *Geological Society of America Bulletin*, 132 (11-12), 2455–2474.

Cantera de Morelia

Alonso-Guzmán, E. M., 1996, Propiedades físicas y mecánicas de ignimbritas del Municipio de Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de investigaciones metalúrgicas, tesis de maestría, 177 pp.

Arenas-Flores, A., 1996, Refractariedad de las ignimbritas o canteras del Municipio de Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, IIM, tesis de maestría, 106 pp.

Carrara, E. y Lanza, D. 1997, La piedra de cantera nella zona di Morelia (Michoacán-Messico): caratteri geologici, petrografici, caratteristiche físico-mecaniche ed impiego a scopo di restauro monumentale: Università degli Studi di Milano, tesi di Laurea, 127 pp.

Corona-Chavez, P., Bigioggero, B., y Garduño-Monroy, V. H., 1997, La Piedra de Cantera entre la tradición y la cultura. En Primer Foro Internacional sobre la Piedra de Cantera, Retrospectiva y perspectivas. H. Ayuntamiento de Morelia, Filmax Publicistas, 19-37.

Carreón-Nieto, H., 2002, Estudio mineralógico, geoquímico y mecánico de ignimbritas de los bancos y el exconvento de San Francisco de la ciudad de Morelia, Michoacán, México, para determinar una restauración adecuado: Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría.

- Bigioggero, B., Corona-Chávez, P., Garduño-Monroy, V. H., Carrara, E. y Lanza, L., 2003, La “piedra de cantera” de Morelia desarrollo entre la tradición y la cultura: un acercamiento geológico y una alternativa, en Garduño-Monroy (ed.), *Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México*, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, 14-42.
- Ostrooumov, M., Garduño-Monroy, V. H., Carreón-Nieto, H. y Lozano Santacruz, R., 2003, Mineralogía y geoquímica de los procesos de degradación en monumentos históricos. Primer acercamiento a un caso mexicano (Morelia, Michoacán): *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20 (3), 223-232.
- Carreón-Nieto, H., Garduño-Monroy, V. H., Ostroumov Fink, M. y Carreón-Nieto, M. C., 2004, Análisis litológico, geoquímico y efectos de intemperismo del exconvento de San Francisco, Morelia, Michoacán, México: una propuesta metodológica para su restauración, en Garduño-Monroy (ed.), *Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México*, Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, 43-56.

Cartografía geológica

- Demant, A., R. Mauvois, y L. Silva-Mora, 1975. Estudio geológico de las hojas Morelia y Maravatío (1/100,000), Estado de Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México, 40 p.
- Demant, A., 1978, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2 (2), 172–187.
- Silva-Mora, L., 1979, Contribution a la connaissance de l'Áxe Volcanique Transmexicain- étude géologique et petrologique des lavas du Michoacan oriental: Marseille, Univerité du Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, tesis de doctorado, 230 pp.
- Demant, A., 1980, L'Áxe Néo-volcanique Transmexicain-étude volcanologique et pétrographique; signification geodinamique: Marseille, Univerité du Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix-Marseille, tesis de doctorado, 259 pp.
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño, V. H., Tibaldi, A. y Vezzoli, L., 1991, Geologic map of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacán, México: Geological Society of America Map and Chart series, MCH072, 22 pp.
- Israde, I., 1995, Bacini lacustri del settore centrale dell'Arco Vulcanico Messicano: Stratigrafia ed evoluzione sedimentaria basara sulle diatomee: Universita degli Studi di Milano, Italia, tesis de doctorado, 254 pp.
- Garduño-Monroy, V. H., Corona-Chávez, P., Israde-Alcantara, I. y Mennella, L., Arreygue, E., Bigioggero, B. y Chiesa, S., 1999, Carta geológica de Michoacán, 1:250,000, Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo, 111 p.

- Garduño-Monroy, V. H., 1999, El vulcanismo del Mioceno-Pliocuatnario de Michoacán, en Garduño-Monroy, V. H., Corona-Chávez, P., Israde-Alcantara, I. y Mennella, L., Arreygue, E., Bigioggero, B. y Chiesa, S. (eds.), Carta geológica de Michoacán, 1:250,000, Universidad Michoacán de San Nicolás de Hidalgo, 27-45.
- Istrade-Alcantara, I. y Garduño-Monroy, V. H., 1999, Lacustrin record in a volcanic intra-arc setting. The evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system, (Central Western Michoacán, Mexico). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 15 (1-3), 209-227.
- Istrade-Alcantara, I., 1999, Los lagos volcánicos y tectónicos de Michoacán, en Garduño-Monroy, V. H., Corona-Chávez, P., Israde-Alcantara, I. y Mennella, L., Arreygue, E., Bigioggero, B. y Chiesa, S. (eds.), Carta geológica del estado de Michoacán, escala 1:250,000: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Secretaría de difusión cultural y extensión universitaria, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, departamento de Geología, Michoacán.
- Garduño, V. H., 1999, Marco tectónico del estado de Michoacán, en Garduño-Monroy, V. H., Corona-Chávez, P., Israde-Alcantara, I. y Mennella, L., Arreygue, E., Bigioggero, B. y Chiesa, S. (eds.), Carta geológica del estado de Michoacán, escala 1:250,000: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Secretaría de difusión cultural y extensión universitaria, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, departamento de Geología, Michoacán.
- Garduño-Monroy, V. H., Rocha, E., Israde-Alcántara, I. y Torres, G., 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*, 18 (1), 37-54.
- Istrade Alcantara, I., Garduño Monroy, V. H., 2004, La geología de la región de Morelia, en Garduño-Monroy (ed.), *Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 1-13.
- Cram, S., Galicia, L. e Israde-Alcantara, I. (eds.), 2010, *Atlas de la Cuenca del- lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental: Morelia, Michoacán*, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 311 pp.
- Osorio-Ocampo, L. S., 2014, *Evolución espacio temporal del vulcanismo alrededor del lago de Pátzcuaro: Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo*, tesis de maestría, 100 pp.
- Kshirsagar, P., Siebe, C., Guilbaud, M. N., Salinas, S. y Layer, P. W., 2015, Late pleistocene Alberca de Guadalupe maar volcano (Zacapu basin, Michoacán): Stratigraphy, tectonic setting and paleo-hydrogeological environment: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 304, 214-236.
- Gómez-Vasconcelos, M. G., Garduño-Monroy, V. H., Macías, J. L., Layer, P. L. y Benowitz, J. A., 2015, *The Sierra Mil Cumbres, Michoacán México: Transitional volcanism between the Sierra Madre Occidental*

- and the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 301, 128-147.
- Cardona Melchor, S., 2015, Estudio vulcanológico del Complejo Volcánico El Águila y los domos La Taza-La Nieve-El Burro, centro-norte de Michoacán: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría, 121 pp.1
- Cisneros-Máximo, G., 2015, Estudio geológico-geomorfológico de los volcanes Tetillas- Quinceo. Propuesta de cartografía Jerárquica: Universidad Nacional autónoma de México, tesis de maestría, 150 pp.
- Pola, A., Martínez-Martínez, J., Macías, J. L., Fusi, N., Crosta, G., Garduño-Monroy, V. H. y Núñez-Hurtado, J. A., 2016, Geomechanical characterization of the Miocene Cuitzeo ignimbrites, Michoacán, Central Mexico: *Engineering Geology*, 214, 79-93.
- Trujillo-Hernández, N., 2017, Estudio geológico, geoquímico y mineralógico de las secuencias volcánicas de la porción suroeste del Lago de Cuitzeo, Michoacán, ligadas a la zona geotérmica de San Agustín del Maíz: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, tesis de maestría, 110 pp.
- Osorio-Ocampo, S., Macías, J. L., Pola, A., Cardona-Melchor, S., Sosa Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H., Layer, P., García-Sánchez, L., Pertou, M. y Benowitz, J., 2018, The eruptive history of the Pátzcuaro Lake area in the Michoacán Guanajuato Volcanic Field, central México: Field mapping, C-14 and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, 307-328.
- Pérez-Orozco, J.D., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V.H., Avellán, D.R., 2018, Felsic-intermediate magmatism and brittle deformation in Sierra del Tzirate (Michoacán-Guanajuato Volcanic Field): *Journal of South American Earth Sciences*, 85, 81–96.
- Ramírez-Urbe, I., Siebe, C., Salinas, S., Guilbaud, M., Layer, P. y Benowitz, J., 2019, ^{314}C and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ radiometric dating and geologic setting of young lavas of Rancho Seco and Mazcuta volcanoes hosting archaeological sites at the margins of the Pátzcuaro and Zacapu lake basins (central Michoacán, Mexico): *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
- Avellán, D. R., Cisneros-Máximo, G., Macías, J. L., Gómez-Vasconcelos, M. G., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G. y Robles-Camacho, J., 2020, Eruptive chronology of monogenetic volcanoes northwestern of Morelia- Insights into volcano-tectonic interactions in the central-eastern Michoacán Guanajuato Volcanic Field, México: *Journal of South American Earth Sciences*, 100, 23 pp.
- Hernández-Bernal, M. S., Corona-Cávez, P., Trujillo-Hernández, N., Macías-Romo, C., Morán-Zenteno, D. J., Jiménez-Haro, A. y Poli, S., 2021, The Cuitzeo granitic xenolith: evidence o fan Early Miocene magma plumbing system in central Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38 (1), 29-42.
- Trujillo-Hernández, N., Garduño-Monroy, V. H., Jiménez-Haro, A., Gómez-Álvarez, F., Nájera-Blas, S. M., Israde-Alcantara, I. y Layer, P., 2022, Estratigrafía volcánica de la porción suroeste del Lago de

Cuitzeo y su relación con la formación de la caldera tipo graben de Chucándiro: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 39 (1), 100-115.

Crecimiento urbano y manejo del territorio

Antaramian-Harutunián, E., Ortega, A. J. M. y Ríos Frías, L. L., 1993, Crecimiento urbano de Morelia y características actuales del terreno utilizado: *UMSNH, Rev. Trimestral de Ciencia, Arte y Cultura*, 10, 48-59.

Vargas-Urbe, G., 1994, El crecimiento urbano-territorial de Morelia (1921-1993): *Ciencia Nicolaíta*, 7, 24-49.

López-Granados, E.M. (1999). Cambio de uso de suelo y crecimiento urbano en la ciudad de Morelia, Michoacán. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 134 p.

López-Granados, E., Bocco, G. y Mendoza Cantú, M. E., 2001, Predicción del cambio de cobertura y uso del suelo. El caso de la ciudad de Morelia: *Boletín del Instituto de Geografía UNAM*, 45, 56-76.

López-Granados, E. M., 2006, Patrones de cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en la Cuenca de Cuitzeo: Centro de Investigaciones en Ecosistemas, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de doctorado.

Ávila, P., 2014, Urbanización, poder local y conflictos ambientales en Morelia, en Vieyra y Larrazábal (eds.), *Urbanización, Sociedad y Ambiente, experiencias en ciudades medias: Morelia, Michoacán*, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 121-149.

Cram, S., Galicia, L. e Israde-Alcantara, I. (eds.), 2010, Atlas de la Cuenca del lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental: Morelia, Michoacán, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 311 pp.

Sánchez-Sepúlveda, H. U. y Urquijo Torres, P. S., 2014, La Expansión urbana en el suroriente de Morelia. Una revisión histórico-ambiental, 1885-2010, en Vieyra y Larrazábal (eds.), *Urbanización, Sociedad y Ambiente, experiencias en ciudades medias: Morelia, Michoacán*, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 13-45.

Vargas-Urbe, G., 2014, Del proyecto de ciudad a la ciudad sin proyecto: el desarrollo histórico territorial de la traza urbana de la ciudad de Valladolid-Morelia 1541-2009, en Vieyra y Larrazábal (eds.), *Urbanización, Sociedad y Ambiente, experiencias en ciudades medias: Morelia, Michoacán*, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 13-45.

Estudios geológicos con enfoque en geotermia

Tello, E. and J.L. Quijano. 1983. Prospecting and geochemical exploration of thermal Zones of Cuitzeo Lake. Federal Electricity Commission,

- Alfaro, R., Matinez, V., Segovia, N., Pena, P., Lopez, M.B.E., Armnienta, M. A., Rangel, J. y Seidel, J. L., 2002, Radon behaviour in springs and Wells around Cuitzeo Lake, Lerma River Basin, Mexico: *Geofísica Internacional*, 41, 439-446.
- Alfaro, R., Martínez, V., Segovia, N., Farias, R., Trujillo, E., 2004, Determinación de la agresividad del agua subterránea en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán: *Ciencia Nicolaita*, 37, 123-132.
- Segovia, N. R., Tello, E., Alfaro, R., Mena, M., Pulinets, S. y Leyva, A., 2005, Geochemical exploration at Cuitzeo Basin Geothermal Zone (Mexico): *Journal of Applied Sciences*, 5 (9), 1658-1664.1
- Guevara Alday, J.A., 2016. Estudios geofísicos y geológicos para la elaboración del modelo conceptual del yacimiento geotérmico de San Agustín del Maíz, Michoacán, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 147 pp.
- Trujillo-Hernández, N., 2017, Estudio geológico, geoquímico y mineralógico de las secuencias volcánicas de la porción suroeste del Lago de Cuitzeo, Michoacán, ligadas a la zona geotérmica de San Agustín del Maíz: Morelia, Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría.
- Olvera García, E., 2017, Estudio de geología estructural, mineralógico y de litofacies de los depósitos hidrotermales de San Agustín del Maíz e Ixtlán de los Hervores, Michoacán: enfocado a la exploración geotérmica. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. 121 p.
- Bermejo Santoyo, G., 2019. Análisis geométrico y fractal de fracturas geológicas en los campos geotérmicos del Lago de Cuitzeo. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. 132 p.
- Olvera-García, E., Garduño-Monroy, V. H., Ostrooumov, M., Bermejo-Santoyo, G., Guevara-Alday, J. A., Brogi, A. y Liotta, D., 2020a, Litofacies y mineralogía de los depósitos de sínter de la zona geotérmica de San Agustín del Maíz, Michoacán, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37 (3), 212-223.
- Olvera-García, E., Garduño-Monroy, V. H., Liotta, D., Brogi, A., Bermejo-Santoyo, G. y Guevara-Alday, J. A., 2020b, Neogene-Quaternary normal and transfer faults controlling Deep-seated geothermal systems: The case of San Agustín del Maíz (central Trans-Mexican Volcanic Belt, México): *Geothermics*, 86, 101791.

Estudios integrales de la cuenca de Cuitzeo

- Bravo Espinosa, M., Vázquez Diego, L. y Blanco Velasco, M., 2008, La cuenca del lago de Cuitzeo: problemática, perspectivas y retos hacia su desarrollo sostenible: Morelia, Mich., Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán.

Cram, S., Galicia, L. e Israde-Alcantara, I. (eds.), 2010, Atlas de la Cuenca del lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socioambiental: Morelia, Michoacán, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 311 pp.

Bravo-Espinosa, M. & Barrera-Camacho, G. & Mendoza, Manuel & Sáenz, J.T. & Bahena, Fernando & Sánchez-Martínez, 2012, Contribuciones para el desarrollo sostenible de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán.

Fallas geológicas y riesgo sísmico

Martínez Solórzano, M. y Hobson, B., 1907, Restos de plantas en basalto: Boletín de la Sociedad Michoacana de Geografía y Estadística, 3 (15), 238-240.

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.

Antaramian-Harutunián, E., Ortega, A. J. M. y Ríos Frías, L. L., 1993, Crecimiento urbano de Morelia y características actuales del terreno utilizado: UMSNH, Rev. Trimestral de Ciencia, Arte y Cultura, 10, 48-59.

Jara, M., Hurtado, F., Jara, J. M. y Suarez, R., 1994, Zonificación sísmica de la Ciudad de Morelia: Boletín Informativo, Escuela de Ingeniería Civil, UMSNH, 5.

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.

Garduño-Monroy, V. H., Escamilla, T. R., 1996, Revisión histórica de la sismicidad en Michoacán, México: Ciencia Nicolaita, 11, 57-81.

González-Ramírez, A., 1997, Riesgo sísmico de la Ciudad de Morelia: Morelia, Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, tesis de licenciatura, 91 pp.

Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, 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, 1 (5), 3-12.

Garduño-Monroy, V. H., Rodríguez-Torres, G. M., Israde-Alcantara, 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, 19 (2), 84-93.

Garduño-Monroy, V. H., Rocha, E., Israde-Alcántara, I. y Torres, G., 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, 18 (1), 37-54.

- Ávila-Olivera J.A. y Garduño Monroy V.H., 2003, Estudios geotécnicos y geofísicos de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla en la Ciudad de Morelia, Michoacán, Geos, Vol. 23, No. 2, p. 138-139.
- Ávila-Olivera, J. A., 2004, Contribución a los estudios geotécnicos y geofísicos en zonas urbanas con Procesos de Subsistencia-Creep-Falla, caso: la Ciudad de Morelia, Michoacán, México: Querétaro, Querétaro, Universidad Autónoma de Querétaro, tesis de Maestría.
- García Estrada, G. H., Garduño Monroy, V. H., Rodríguez Torres, G. y López Hernández, A., 2004, Estudio gravimétrico de desniveles topográficos en la zona urbana de Morelia, Michoacán, en Garduño-Monroy (ed.), Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 255-268.
- Ibáñez-Garduño, D., Álvarez, B. R., Garduño-Monroy, V. H., Israde-Alcantara, I. y Arreygue-Rocha, E., 2004, Determinación de zonas de Falla-Creep en áreas urbanas de antiguas zonas lacustres, mediante el Georadar, en Garduño-Monroy (ed.), Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 241-254.
- Ávila-Olivera, J. A., and V. H. Garduño-Monroy, 2006, Hundimientos ocasionados por Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF) en la Ciudad de Morelia, Mich., México: Geotermia 19 (2), 50-59.
- Ávila-Olivera J.A. y Garduño-Monroy V.H., 2006, El abatimiento de los niveles freáticos es sólo un elemento de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla, caso: la Ciudad de Morelia, Michoacán, Geos, Vol. 26, No. 1, p. 186.
- Ávila-Olivera, J. A., and V. H. Garduño-Monroy, 2008, A GPR study of subsidence-creep-fault process in Morelia, Michoacán, Mexico: Engineering Geology, 100, 69–81.
- Ávila-Olivera, J.A., 2008, Evolución de los Procesos de Subsistencia-Creep-Falla, casos: Morelia, Michoacán y Celaya, Guanajuato: México, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, tesis doctoral, 232 pp.
- Farina P, Ávila-Olivera JA, Garduño-Monroy VH y Catani F, 2008. “DInSAR analysis of differential ground subsidence affecting urban areas along the Mexican Volcanic Belt (MVB)”. *Rivista italiana di Telerilevamento*. Pp. 103-113.
- Garduño-Monroy, V. H., Pérez-López, R., Israde-Alcantara, I., Rodríguez-Pascua, M. A., Szyńska-Ruk, E., Hernández-Madrigal, V. M., García-Zepeda, M. L., Corona-Chávez, P., Ostroumov, M., Medina-Vega, V. H., García-Estrada, G., Carranza, O., López-Granados, E. y Mora Chaparro, J. C., 2009, Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico: *Geofísica Internacional*, 48 (3), 319-335.
- Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., y Farina, P., 2010, Integrated study of land subsidence in Morelia, Michoacán, Mexico. In D. Carreón-Freyre (Ed.), *Land subsidence, associated hazards and the role of*

- natural resources development. *Hydrological Sciences Journal, Red Book Series*. (pp. 185–190) Wallingford, Oxfordshire: IAHS Press IAHS Publ. n. 339.
- Hernández-Madrigal, V.M., Garduño-Monroy, V.H., Ávila-Olivera, J.A., 2011. ATLAS DE PELIGROS GEOLOGICOS DE LA CIUDAD DE MORELIA, MICH: Estandarización del documento, actualización cartográfica de fallas geológicas de la zona urbana, y evaluación de tasas de hundimiento. SEDESOL Programa HABITAT 83.
- Cigna, F., Osmanoglu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., DeMets, C., y Wdowinski, S., 2012, Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico: *Remote Sensing of Environment*, 117, 146-161.
- Giner-Robles, J. L., V. H. Garduño-Monroy, J. E. Díaz Salmeron, V. M. Hernández-Madrigal, R. Pérez-López, M. A. Rodríguez-Pascua, P. G. Silva, and J. Ávila Olivera (2012). Geological structural analysis of surface deformations of Morelia system faults, in *Earthquake Geology and Archaeology: Science, Society, and Seismic Hazard*, R. Pérez-López, P. G. Silva, M. A. Rodríguez-Pascua, V. H. Garduño-Monroy, G. Suárez, and K. Reicherter (Editors), *Proc. of the 3rd INQUA–IGCP- 567 International Workshop on Active Tectonics, Paleoseismology, and Archaeoseismology, Morelia, Mexico*, 19–24 November 2012, 59–62.
- Villaseñor-Reyes, C.I., 2014. Caracterización geomecánica y estudio del deslizamiento El Campestre, Morelia, Mich. (Tesis de Maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.
- Hernandez Madrigal, V. M., Flores, N., Villaseñor, C. I. y Muñíz, G. A. 2015, Impacto económico producido por subsidencia diferencial en zonas urbanas. Caso de estudio Morelia, Mich.: *Ciencia Nicolaita*, 65.
- Suter, A., 2016, Structure and Holocene rupture on the Morelia Fault, Trans-Mexican Volcanic Belt, and Their Significance for Seismic-Hazard Assessment: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (5), 12 pp.
- Figuroa-Miranda, S., 2019. Análisis del fenómeno subsidencia-inundación mediante InSAR y FLO-2D en la ciudad de Morelia, Michoacán (PhD Thesis). Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, México.
- Soria-Caballero, D. C., 2019, Evidence for quaternary seismic activity of the La Alberca-Teremendo fault, Morelia region, Trans-Mexican Volcanic Belt: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 36 (2), 242-258.
- Lázaro-Mancilla, O., Garduño-Monroy, V. H., Mendoza-Ponce, A., Figuroa-Soto, A., Vazquez-Rosas, R., Ramirez-Tapia, G. M. y Cortés-Silva, A., 2020, Concentraciones de gas radón (^{222}Rn) en suelo de la zona urbana de Morelia, Michoacán, México y su relación con fallas potencialmente sísmicas y

asociadas con el proceso de subsidencia-fluencia: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 37 (2), 157-177.

Figueroa-Miranda, S., Hernández-Madrigal, V. M., Tuxpan-Vargas, J. y Villaseñor-Reyes, C. I., 2020, Evolution assessment of structurally-controlled differential subsidence using SBAS and PS interferometry in an emblematic case of central Mexico: *Engineering Geology*, 279, 105860.

Gómez-Vasconcelos, M. G., Avellán, D. R., Soria-Caballero, D., Macias, J. L., Velázquez-Bucio, M., Jiménez-Haro, A., Israde-Alcantara, I., Garduño-Monroy, V. H., Ávila-Olivera, J. A., Figueroa-Soto, A. G., Cisneros-Máximo, G., y Cardona-Melchor, S., 2021, Geomorphic characterization of faults as earthquake sources in the Cuitzeo Lake basin, central México: *Journal of South American Earth Sciences*, 109, 103196.

Soria-Caballero, D. C., 2021, Evidencias geológicas, geomorfológicas y geofísicas de deformación asociada a la falla Cerritos y su implicación en el peligro sísmico de Morelia, Michoacán, México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 38 (3), 239-258.

Soria-Caballero, D. C., Gómez-Calderón, D. A. y Garduño-Monroy, V. H., 2021, Análisis paleosísmico de la falla El Malpaso – El Salto, norte de Michoacán, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73 (2), A181220.

Problemática geológico-ambiental de la ubicación de los tiraderos de basura

Buenrostro O., 2001, La generación de residuos sólidos urbanos en la cuenca del lago de Cuitzeo, México. Informe final. Proyecto financiado por el fondo para retener en México y repatriar investigadores mexicanos, con expediente No. 000323 del CONACyT, 36 p.

Buenrostro O., Bocco G. y Bernache G., 2001, Urban solid waste generation and disposal in Mexico. A case study. *Waste Manag. Res.* 19, 169-176.

Buenrostro O., Bocco G. y Cram S., 2001, Classification of sources of municipal solid wastes in developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 32, 29-41.

Buenrostro, O., Israde, I., 2003. La gestión de los residuos sólidos municipales en la cuenca del lago de Cuitzeo, México: *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 19(4), 161-169.

Israde-Alcantara, I., Garduño-Monroy, V. H., Ibáñez-Garduño, D., Alatorre, M. A., Carrillo-Chávez, A., Rizzi, A. y Soto, L., 2004, Caracterización geológico-ambiental del tiradero de Morelia y su relación con las poblaciones del entorno, en Garduño-Monroy (ed.), *Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México*, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 137-155.

- Buenrostro Delgado, O., 2004, Los tiraderos municipales y el impacto ambiental de los residuos sólidos en la cuenca del lago de Cuitzeo, México, en Garduño-Monroy (ed.), Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 89-105.
- Israde-Alcantara I., Buenrostro Delgado, O. y Carrillo Chávez, A., 2005, Geological Characterization and Environmental Implications of the Placement of the Morelia Dump, Michoacán, Central Mexico: Journal of the Air and Waste Management Association, 55(6), 755-764.
- Israde-Alcantara, I., Buenrostro-Delgado, O., Garduño-Monroy, V. H., Hernández-Madrigal, V. M. y López-Granados, E., 2009, Problemática geológico-ambiental de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, norte del estado de Michoacán: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 60 (2), 203-211.
- Gonzales-Arqueros, M. L., Domínguez-Vázquez, G., Alfaro-Cuevas-Villanueva, R., Israde-Alcántara, I. y Buenrostro-Delgado, O., 2021, Hazardous solid Waste confined in closed dump of Morelia: An urgent environmental liability to attend in developing countries: Sustainability, 13, 2557.

Procesos de remoción en masa

- Hernández-Madrigal, V. M., 2001, Caracterización y estudio de las arcillas y estudio geomorfológico del movimiento en masa de San Miguel del Monte, Michoacán, México: Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría, 95 pp.
- Alditurriaga-González, O., 2002, Caracterización de los materiales involucrados en el deslizamiento en masa del Campestre en la ciudad de Morelia, Michoacán: Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis de licenciatura, 134 pp.
- Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V. H., Canuti, P., Casaglie, N., Iotti, A. y Chiesa, S., 2002, Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma, en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 19 (2), 91-106.
- Garduño-Monroy, V. H., Hernández-Madrigal, V.M., Arreygue-Rocha, E., 2002, Estudio Geotécnico y Geofísico del camino en el fraccionamiento Cumbres de las Américas en Ocolusen, Morelia, Michoacán: Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Departamento de Geología y Mineralogía, Reporte, 25pp.
- Arreygue-Rocha, E., Hernández-Madrigal, V.M., Garduño-Monroy, V. H., 2003, Estudio Geotécnico y Geofísico del sector sur (La Mesa) del club campestre, Morelia, Michoacán: Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Departamento de Geología y Mineralogía, Reporte, 18 pp.
- Domínguez-Ortiz, F., 2003, Los procesos de remoción en masa y sus relaciones con la sismicidad potencial en el sector de Ocolusen de la falla La Paloma, Morelia, Michoacán; México: Morelia, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Tesis de licenciatura, 115 pp.

- Hernández-Madrigal, V. M., Garduño-Monroy, V. H. y Ostroumov, M., 2004, Caracterización del proceso de remoción en masa de San Miguel del Monte, Morelia, Mich., en Garduño-Monroy (ed.), Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 199-224.
- Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V. H., Hernández-Madrigal, V. M., Canuti, P., Casagli, N., Lotti, A., Mora-Vences, F. y Alditurriaga-González, O., 2004, Inestabilidad de taludes en el escarpe La Paloma: riesgo real y potencial, en Garduño-Monroy (ed.), Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 181-198.
- Pola-Villaseñor, A., Garduño-Monroy, V. H., Díaz-Salgado, C., y Hernández-Madrigal, V. M., 2006, Estudio geotécnico asociado a procesos de remoción en masa del parque Francisco Zarco (Ocolusen), Morelia (Michoacán, México): Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 58 (2), 183-193.
- Villaseñor-Reyes, C.I., 2014. Caracterización geomecánica y estudio del deslizamiento El Campestre, Morelia, Mich. (Tesis de Maestría). Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán, México.

Riesgos hidrológicos

- Arreygue, R. E., 1999, Le condizioni di pericolosità idrogeologica nella città di Morelia, Michoacan (Messico): Università degli studi di Perugia, tesis de doctorado. 171 pp.
- Arreygue Rocha, E., y Garduño-Monroy, V. H., 2004, Eventos excepcionales e inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán: Revista Ciencia Nicolaíta, 39, 47-60.
- Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V. H., Canuti, P., Casaglie, N. y Iotti, A., 2004, Inundaciones históricas y potenciales en la ciudad de Morelia relacionadas con el río chiquito, en Garduño-Monroy (ed.), Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental: Morelia, Michoacán, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 225-240.
- Arreygue Rocha, E., Alcalá Ochoa, S. y Garduño-Monroy, V. H., 2005, Estudio geológico, hidrológico, hidráulico y topográfico de las zonas potenciales a inundaciones de las colonias Jardines de Santiaguito, Jaime Nuno y Carlos Salazar, en el municipio de Morelia, Michoacán: Informe técnico, 29 pp.
- Arreygue Rocha, E., Garduño Monroy, V. H., Canuti, P., Casagli, N. y Iotti, A., 2005, Riesgos geomorfológicos e hidrológicos en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México: Geotermia, 18 (1), 26-36.
- Hernández, J. y Vieyra, A., 2010, Riesgos por inundaciones en asentamientos precarios del periurbano. Morelia, una ciudad media mexicana. ¿El desastre nace o se hace?: Revista de Geografía Norte Grande, 45-62.
- Rodríguez-Castro, J. A., García-Acevedo, R. y Ruíz-Chávez, R., 2011, Simulación del impacto de las descargas de agua residual en el río grande de Morelia, en Bravo-Espinosa, M., Barrera-Camacho, G., Mendoza,

M. E., Saenz, J. T., Bahena-Juárez, F. y Sánchez-Martínez, R. (eds.), Contribuciones para el desarrollo sostenible de la Cuenca de Cuitzeo: Morelia, Michoacán, México, Universidad Nacional Autónoma de México-Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, 177-185.

Arreygue-Rocha, E., Gómez, N. P., Negrete, C. C. e Ibarra, J. A., 2012, Estudio de las inundaciones en la ciudad de Morelia, Michoacán, México: Revista de Geología aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 103-110.

Secuencias fluvio-lacustres

Israde-Alcantara, I., 1991, Los lagos volcánicos y tectónicos de Michoacán, en Corona-Chavez, P. e Israde-Alcantara, I., (eds.), Carta geológica del estado de Michoacán, escala 1:250,000: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Secretaría de difusión cultural y extensión universitaria, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, departamento de Geología, Michoacán.

Israde, I., 1995, Bacini lacustri del settore centrale dell'Arco Vulcanico Messicano: Stratigrafia ed evoluzione sedimentaria basata sulle diatomee: Università degli Studi di Milano, Italia, tesis de doctorado, 254 pp.

Israde-Alcantara, I., 1997, Neogene diatoms of Cuitzeo Lake Central Sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt and their relationship with the Volcano-Tectonic evolution: Quaternary International, 43-44, 137-143.

Israde, I., Garduño, V. H. y Ferrari, M., 1992, El Origen Transtensivo de la Depresión del Lago de Cuitzeo, México, en Actas de las Sesiones Científicas, Congreso Latinoamericano de Geología, Salamanca, España, 4, 127-131.

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.

Israde-Alcantara, I., Domínguez, J. M. y Robles, J., 1999, Geochemical and mineralogical characterization of the clays from Charo Paleolake. Catena (submitted).

Israde-Alcantara, I. y Garduño-Monroy, V. H., 1999, Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting. The evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system, (Central Western Michoacán, Mexico). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 15 (1-3), 209-227.

Israde-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V.H., Ortega-Murillo, R., 2002, Paleambiente lacustre del Cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo: Hidrobiológica, 12 (1), 61-78.

Israde-Alcántara, I., Robles-Camacho, J. y Domínguez, J. M., 2008, Beidellite-nontronite clays in Neogene sediments from Cuitzeo-Charo lacustrine basin, Michoacán, México, geological setting and paleoenvironmental implications: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 60 (2).

Sánchez, M. J., 2011, Descripción del límite Pleistoceno-Holoceno en cuencas lacustres vulcano-tectónicas Zacapu y Cuitzeo, del norte del estado de Michoacán: D. F., México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 231 pp.

Sierra de Mil Cumbres

Macías J.L., A. J., 2009, Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán, Instituto de Geofísica, UNAM.

Pérez Esquivias, H., Macías Vázquez, J.L., Garduño Monroy, V.H., Arce Saldaña, J.L., García Tenorio, F., Castro Govea, R., Hernández, R., 2010, Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.: *Geotermia*, 23 (2), 51–63.

Gómez-Vasconcelos, M. G., 2012, Geología y estratigrafía volcánica de la Sierra de Mil Cumbres, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría, 141 pp.

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

Sistema de fallas Morelia-Acambay

Urbina, E, y Camacho, H., 1913, La zona megasísmica Acambay-Tixmadej (Estado de México), conmovida el 19 de noviembre de 1912: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 32, 125 pp.

Astiz, L. M., 1980, Sismicidad en Acambay Estado de México. El temblor del 22 de febrero de 1979: Universidad Nacional Autónoma de México, tesis, 130 pp.

Astiz, L. M., 1986, The 1912 Acambay, Mexico ($M_s = 7.0$) earthquake: a reexamination (abstract): *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, época II, special issue, 17.

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,

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. The Venta del Bravo fault: *Journal of Geophysical Research*, 97 (B8), 11983-11994.

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*, 14 (5), 1245-1262.

- Suter, M., Carrillo-Martínez, M., y Quintero- Legorreta, O., 1996, Macro seismic study of shallow earthquakes in the central and eastern parts of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico: *Seismological Society of America, Bulletin*, 86 (6), 1952-1963.
- Ramírez-Herrera, M. T., 1996, Morphological Evidence for Neotectonic Activity and seismic Hazard in the Acambay Graben, Mexican Volcanic Belt: *Geomorphic Hazards*, Ed. Olav Slaymaker, John Wiley & Sons, 29-41.
- Langridge, R. M., Weldon, R. J., Moya, J. C., Suárez, G., 2000, Paleoseismology of the 1912 Acambay earthquake and the Acambay-Tixmadejé fault, Trans-Mexican Volcanic Belt: *Journal of Geophysics Research*, 105 (B2), 3019-3037.
- Suter, M., López-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O. y Carrillo-Martínez, M., 2001, Quaternary intra-arc extensión in the central Trans-Mexican volcanic belt: *GSA Bulletin*, 113 (6), 693-703.
- Szynkaruk, E., 2004, Tectonic implications of geomorphologic and structural characteristics of the Morelia-Acambay fault system, central trans-mexican volcanic belt: Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de doctorado, 108 pp.
- Szynkaruk, E., 2004, Active fault systems and tectono-topographic configuration of the central Trans-Mexican Volcanic Belt: *Geomorphology*, 61(1-2), 111-126.
- Garduño-Monroy, V. H., Pérez-López, R., Israde-Alcantara, I., Rodríguez-Pascua, M. A., Szynka-ruk, E., Hernández-Madrigal, V. M., García-Zepeda, M. L., Corona-Chávez, P., Ostroumov, M., Medina-Vega, V. H., García-Estrada, G., Carranza, O., López-Granados, E. y Mora Chaparro, J. C., 2009, Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico: *Geofísica Internacional*, 48 (3), 319-335.
- Suter, A., 2016, Structure and Holocene rupture on the Morelia Fault, Trans-Mexican Volcanic Belt, and Their Significance for Seismic-Hazard Assessment: *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106 (5), 12 pp.
- Mendoza-Ponce, A., Figueroa-Soto, A., Soria-Caballero, D., and Garduño-Monroy, V.H., 2018, Active faults sources for the Pátzcuaro–Acambay fault system (Mexico): fractal analysis of slip rates and magnitudes M_w estimated from fault length: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18 (11).
- Soria-Caballero, D.C., Garduño-Monroy, V.H., Alcalá, M., Velázquez-Bucio, M.M., Grassi, L., 2019, Evidence for quaternary seismic activity of the La Alberca-Teremendo Fault, Morelia region, Trans-Mexican Volcanic Belt: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 36, núm. 2, p. 242-258.
- Olvera-García, E., Garduño-Monroy, V. H., Liotta, D., Brogi, A., Bermejo-Santoyo, G. y Guevara-Alday, J. A., 2020, Neogene-Quaternary normal and transfer faults controlling Deep-seated geothermal systems: The case of San Agustín del Maíz (central Trans-Mexican Volcanic Belt, México): *Geothermics*, 86, 101791.

- Gómez-Vasconcelos, M. G., Avellán, D. R., Soria-Caballero, D., Macías, J. L., Velázquez-Bucio, M., Jiménez-Haro, A., Israde-Alcantara, I., Garduño-Monroy, V. H., Ávila-Olivera, J. A., Figueroa-Soto, A. G., Cisneros-Máximo, G., y Cardona-Melchor, S., 2021, Geomorphic characterization of faults as earthquake sources in the Cuitzeo Lake basin, central México: *Journal of South American Earth Sciences*, 109, 103196.
- Soria-Caballero, D. C., Gómez-Calderón, D. A. y Garduño-Monroy, V. H., 2021, Análisis paleosísmico de la falla El Malpaso – El Salto, norte de Michoacán, México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 73 (2), A181220.
- Menella, L., Garduño-Monroy, V. H., Giner Robles, J. L., Liotta, D., Brogi, A., 2022, Definición del campo de esfuerzos-deformación y sismotectónica del sistema de fallas Morelia-Acambay: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 39 (1), 82-99.

Sobreexplotación de acuíferos

- Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcantara, I. y 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*, 18 (1), 37-54.
- Ávila-Olivera, J.A y Garduño-Monroy, V. H., 2007, Análisis del abatimiento de los niveles freáticos del sistema acuífero de Morelia: *Ciencia Nicolaita*, 46.
- Garduño-Monroy, V.H., Medina-Vega V.H., Israde-Alcántara, I., Hernández-Madrugal, V.M., Ávila-Olivera, J.A., 2010, Unidades Geohidrológicas de la Región de Morelia- Cuitzeo, Características Físicas, en Cram, S., Galicia, L., Israde-Alcántara, I. (comps.), *Atlas de la cuenca del lago de Cuitzeo: Análisis de su geografía y entorno socio ambiental: México, UNAM*, 66–69.
- Garduño-Monroy, V. H., Giordano, N., Ávila Olivera, J. A., Hernández Madrugal, V. M., Sámano Nateras, A. y Díaz Salmerón, J. E., 2014, Estudio hidrogeológico del sistema acuífero de Morelia Michoacán, para una correcta planificación del territorio, Vieyra A. y Larrazabal, A. (eds.) *Urbanización, Sociedad y Ambiente: Morelia, Michoacán, México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México*, 197-222.
- Estrada-Murillo, M. A., 2015, Análisis hidroquímico, modelación e interpretación del comportamiento del agua subterránea que abastece a la zona de Morelia, Michoacán, México: Morelia, Michoacán, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, tesis de maestría.
- Pérez-Villarreal, J., Ávila-Olivera, J. A., e Israde-Alcántara, E., 2018, Análisis de los sistemas de flujo en un acuífero perturbado por la extracción de aguas subterráneas. Caso zona Morelia-Capula, Michoacán: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 70(3), 675-688.
- Gómez Sandoval, L., 2019, Dinámica de acuíferos que abastecen la ciudad de Morelia: Morelia, Michoacán, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de maestría, 180 pp.

Pérez-Villareal, J., Ávila-Olivera, J. A., Israde-Alcántara, I. y Buenrostro-Delgado, O., 2019, Nitrate as a parameter for differentiating groundwater Flow systems in urban and agricultural areas: the case of Morelia-Capula area, Mexico: Hydrogeology Journal.

ANEXO 3. LOCALIZACIÓN DE LAS GEOFORMAS VOLCÁNICAS DE LA REGIÓN DE MORELIA

Tabla 6. Clasificación de geoformas volcánicas de la Región de Morelia con ubicación geográfica.

Geoforma	Nombre	Latitud	Longitud
Cono	Cerro Pelón	19.8596066	-101.428942
Maar	La Alberca	19.8068463	-101.454153
Cono	Cerro Pelón	19.7946147	-101.453277
Cono	Tzintzimatato Chico	19.7658875	-101.44899
Cono	Zajo Grande	19.7496714	-101.437456
Cono	Coro Grande	19.7615267	-101.4116
Cono	Teremendo Jasso	19.7301313	-101.461056
Cono	Cerro Hueco	19.7205944	-101.492522
Cono	El Melón	19.6724983	-101.431892
Escudo	Buena Vista	19.6700701	-101.448273
Cono	Irauco	19.6715778	-101.456131
Cono	Atzimbo	19.6472889	-101.507214
Cono	Los Corrales	19.5882757	-101.515576
Domo	Chapultepec	19.5566991	-101.525545
Cono	El Cambio	19.554066	-101.512235
Cono	El Cambio	19.5500258	-101.514324
Cono	La Providencia	19.5485891	-101.480777
Cono	Prieto	19.5552013	-101.471244
Cono	El Molcajete	19.5559588	-101.464304
Cono	La Loma	19.567523	-101.458226
Domo	El Burro	19.4446654	-101.504276
Domo	El Burro	19.434305	-101.512328
Cono	El Tigre	19.475822	-101.502658
Cono	La Panhuata	19.4756849	-101.493886
Cono	Unguaran	19.4814711	-101.476076
Domo	La Nieve	19.4481756	-101.417969
Cono	Los Puercos	19.4560986	-101.432819
Domo	La Taza	19.4495195	-101.441143
Domo	Cuarameo	19.4318828	-101.447057
Cono	La Arena	19.6466654	-101.359617
Escudo	El Águila	19.6245999	-101.364252
Cono	Águila Oeste	19.6259721	-101.380094
Cono	Cerritos	19.6911419	-101.341553
Escudo	Quinceo	19.7550943	-101.257149

Cono	Cerro Prieto	19.7412477	-101.293936
Domo	La Cruz	19.7424286	-101.328734
Escudo	El Picacho	19.8191546	-101.423405
Cono	El Reparo	19.8055917	-101.385334
Cono	Guajate	19.8459904	-101.436586
Domo	Guadalupe	19.4900725	-101.351069
Domo	El Divisadero	19.5086323	-101.356875
Cono	San Isidro	19.5194417	-101.4309
Domo	El Gallo	19.5315235	-101.409903
Escudo	La Trampa	19.5252714	-101.288254
Domo	La Camba	19.4626928	-101.303318
Domo	El Pozole	19.4511259	-101.295344
Domo	La Muela	19.5063729	-101.528961
Domo	Cerro Azul	19.6808747	-101.477015
Domo	Cerro Chino	19.7052659	-101.495417
Cono	La Alberquilla	19.7473317	-101.507716
Cono	Iratzio	19.633472	-101.404033
Spatter	Icuacato	19.6950966	-101.445328
Domo	El Estadio	19.7212645	-101.238888
Domo	El Tzirate	19.7304102	-101.513266
Domo erosionado	Punhuato	19.7019158	-101.130267
Caldera	Atécuaro	19.5942536	-101.195519
Cono	La Caja	19.5889217	-101.439758
Cono	El Correo	19.631514	-101.412393
Caldera	La Escalera	19.6063814	-101.061289
Domo	La Taza	19.4531702	-101.444849
Escudo	Sanambo	19.6467691	-101.439947
Domo	Las Rosas	19.7429524	-101.486242
Domo	El Varal	19.7610785	-101.51627
Domo	El Pinal	19.776199	-101.523456
Domo	Cerro Cuates	19.7699908	-101.515621
Domo	El Caracol	19.8100456	-101.492006
Domo	Cayihuanatin	19.8037985	-101.525465
Domo	El Carpintero	19.7872124	-101.50742
Spatter	Cerro Blanco	19.8644731	-101.411777
Escudo	Las Tetillas	19.7415341	-101.288451
Cono	Aguila Norte	19.6352147	-101.359728
Spatter	Cerro Prieto	19.8553573	-101.425369
Domo	La Yerbabuena	19.5163856	-101.405701
Spatter	Pastores	19.5462302	-101.407162
Spatter	Lagunillas	19.5481207	-101.415855
Cono	Colorado	19.5657024	-101.490619
Domo	El Huracán	19.5945902	-101.527943

Cono	Santa Cruz	19.6155001	-101.52748
Cono	El Olvido	19.6329868	-101.487608
Cono	Rancho Seco	19.6184105	-101.471993
Cono	Cerro Pelón	19.7021644	-101.323047
Cono	El Molcajete	19.7474744	-101.362212
Cono	El Malacate	19.7352464	-101.367543
Cono	San Bernabé	19.7200249	-101.390997
Domo	La Palmilla	19.752133	-101.496179
Domo	Tariacuaro	19.7692089	-101.489882
Cono	Las Vigas	19.7643847	-101.492472
Domo	Las Tetillas	19.7414126	-101.283664
Cono	Las Rosas	19.6919153	-101.523342
Domo	El Tejamanil	19.7081369	-101.53725
Spatter	Los Huapes	19.7584833	-101.484848
Spatter	Teterio	19.7647302	-101.479123
Spatter	Yopécuaro	19.7535144	-101.477435
Domo	La Taza	19.4490562	-101.433907
Domo	Chato	19.5169552	-101.51008
Domo erosionado	Tumbisca	19.5743375	-101.080941
Domo	El Sauz	19.674754	-101.503438
Domo	El Sauz	19.6735127	-101.498773
Cono	Las Albercas	19.6113871	-101.365338
Cono	La Loma	19.6077559	-101.299629
Cono	El Metatero	19.6130684	-101.339123
Cono	Rancho Seco	19.6234571	-101.475247
Cono	Rancho Seco	19.6234676	-101.482451
Cono	Rancho Seco	19.6215552	-101.46989
Cono	Las Vigas	19.7641928	-101.489204
Domo	La Rosa de San Juan	19.5260825	-101.437742
Domo	El Zopilote	19.4580542	-101.278831
Domo	Las Cuevas	19.4484957	-101.245122
Cono	La Cruz	19.5350166	-101.480034
Domo erosionado	Puentecillas	19.5559994	-101.18772
Domo erosionado	Puerto de Celaya	19.5658079	-101.196676
Domo erosionado	Las Vigas	19.553413	-101.21365
Domo erosionado	Las Juntas	19.5696447	-101.224839
Domo erosionado	El Durazno	19.6366465	-101.178344
Domo erosionado	Puerto Blanco	19.6367471	-101.199531

Domo erosionado	La Torrecilla	19.6279859	-101.171399
Domo erosionado	Torrecillas	19.6176999	-101.138437
Domo erosionado	El Laurelito	19.6469214	-101.113423
Domo erosionado	La Sierrita	19.6204749	-101.042234
Domo erosionado	La Puente	19.6166667	-101.052242
Domo erosionado	El Palmar	19.6038369	-101.047017
Domo erosionado	El Tremecino	19.6032437	-101.069656
Domo erosionado	Peña del Agua	19.5690767	-101.072555
Domo erosionado	Santas Marías	19.5573561	-101.084793
Domo erosionado	Aguacatito	19.5495347	-101.083949
Domo erosionado	Los Cimientos	19.5418573	-101.102629
Escudo	El Frijol	19.4609246	-101.542775
Cono	Los Lobos	19.5029043	-101.54746
Domo	La Muela	19.5110816	-101.522039
Domo	La Muela	19.5047014	-101.524483
Cono	Buena Vista	19.5478643	-101.544685
Escudo	Yahuarato	19.6145776	-101.553197
Escudo	Zapata	19.8824513	-101.103977
Spatter	Zajo	19.7464908	-101.431967
Spatter	Biricuaran	19.711209	-101.402782
Spatter	Joyitas del Valle	19.705856	-101.371762
Escudo	El Remolino	19.6216122	-101.336681
Spatter	Tendeparacua	19.8935827	-101.43929
Spatter	Granjas	19.693	-101.377833
Spatter	Tendeparacua	19.8730759	-101.447179
Cono	El Tlacuache	19.8420001	-101.189634
Cono	Cerro Colorado	19.8284585	-101.198677
Cono	El Trujillo	19.8259017	-101.220547
Spatter	La Tranca	19.6892487	-101.386621
Domo	Zoromuta	19.4366856	-101.431445
Domo	El Divisadero	19.6559353	-101.293081
Domo	Cerro Blanco	19.4806475	-101.434677
Domo	Santa Genoveva	19.4733774	-101.456633
Domo	San Rafael Coapa	19.5217959	-101.361552
Domo	La Taza	19.4537837	-101.43914
Domo	El Cocinero	19.4786996	-101.367088
Domo	La Granja	19.5574711	-101.401243

Domo	Petrerillos	19.5093095	-101.417818
Cono	La Mesa	19.5748306	-101.430118
Cono	Los Caballos	19.702314	-101.440311
Cono	La Mina	19.7137392	-101.433682
Cono	Cerro Hueco	19.7220045	-101.490131
Cono	El Agua	19.7405592	-101.534431
Cono	El Molcajete	19.7753346	-101.529462
Cono	Los Huapes	19.7580812	-101.491327
Cono	Jamanal	19.6849957	-101.35102
Spatter	Tanimireche	19.8751978	-101.410799
Spatter	El Muerto	19.8893881	-101.460226
Cono	Yopécuaro	19.7540947	-101.486762
Spatter	Los Huapes	19.7578549	-101.486869
Spatter	Yopécuaro	19.7548229	-101.480571
Cono	Yuretzió	19.4535608	-101.486503
Spatter	Tzintzamacato Chico	19.7679084	-101.443904
Spatter	Zajo Chico	19.7505751	-101.412312
Cono	San Bernabé	19.7275331	-101.398039
Cono	El Jacal	19.7594859	-101.556585
Cono	Joyitas	19.7263937	-101.381445
Spatter	Cerritos	19.6987289	-101.330315
Domo	El Paredón	19.4714725	-101.264145
Domo	Zirapio	19.4611298	-101.269215
Domo	La Pitahaya	19.4557962	-101.238899
Domo	Las Tablas	19.4955453	-101.456405
Spatter	Mesa El Gachupin	19.624921	-101.448138
Domo erosionado	Cerro Prieto	19.7066109	-101.117506
Domo erosionado	Cerro de Enmedio	19.6420188	-101.096033
Domo erosionado	El Guayabito	19.5640222	-101.065576
Domo	La Tirimicua	19.6922514	-101.491293
Domo erosionado	El Aguacate	19.592614	-101.052135
Domo erosionado	C. Las Ánimas	19.5989655	-101.216679
Domo erosionado	Torrecillas	19.6126253	-101.209765
Domo erosionado	C. El Venado	19.6267658	-101.188876
Domo erosionado	C. La Peña	19.6114795	-101.178535
Domo erosionado	C. Verde	19.59825	-101.167111
Domo erosionado	Agua Escondida	19.6061206	-101.162973

Domo erosionado	C. de Aparicio	19.6772245	-101.100347
Spatter	Sanambo	19.6504691	-101.442796
Domo	Huiramos	19.7560231	-101.519332
Domo	C. Cuates	19.766401	-101.518758
Domo	C. Canacurio	19.7620767	-101.508264
Domo	Carpintero	19.7782674	-101.511861
Domo	Ziratitos	19.7433253	-101.518164
Domo	C. Mora	19.7202759	-101.519406
Domo erosionado	Puerto La Silleta	19.6079573	-101.092178
Domo erosionado	C. El Aguacate	19.5857968	-101.038403
Domo erosionado	Buenavista	19.5573215	-101.224608
Domo erosionado	Huertitas	19.5853361	-101.2117
Caldera	Puerto La Sosa	19.5251521	-101.121
Domo erosionado	C. Pelón	19.5641823	-101.056757
Domo erosionado	C. Las Ánimas	19.5769969	-101.053712
Domo erosionado	El Tularcillo	19.5723799	-101.056207
Domo erosionado	Ciénega	19.5743726	-101.04858
Domo erosionado	C. Los Pinos	19.5710007	-101.042665
Domo erosionado	El Alacrán	19.6099718	-101.105693
Spatter	C. Curcha	19.8675566	-101.227033
Spatter	C. Largo	19.8659013	-101.254618
Spatter	El Puerto	19.858918	-101.258095
Cono	C. La Trampa	19.4355466	-101.375397
Cono	C. La Calavera	19.4330896	-101.383462
Domo	Genoveva	19.478767	-101.458283
Spatter	C. Caracol	19.8896768	-101.259408
Domo erosionado	C. Blanco	19.7212644	-101.128233
Cono	C. La Batea	19.8808666	-101.369722

ANEXO 4. RECOPIACIÓN DE EDADES ISOTÓPICAS DE LA REGIÓN DE MORELIA

Tabla 7. Recopilación de edades isotópicas publicadas del área de estudio (RM). Las edades registradas corresponden a las edades reportadas como preferidas por los autores de acuerdo a diferentes métodos de corrección.

Unidad	Método	Edad	Referencia	Y	X
Ignimbrita Mesa Tzitzio	K-Ar	33.44±1.7 Ma	Pasquarè et al. (1991)	19.6	-100.94
Ignimbrita Puerto La Sosa	K-Ar	20.53±1.0 Ma	Pasquarè et al. (1991)	19.51	-101.13
Ignimbrita Morelia	K-Ar	17.70±0.5 Ma	Pasquarè et al. (1991)	19.63	-101.27
Sierra de Mil cumbres	K-Ar	16.20±0.8 Ma	Pasquarè et al. (1991)	19.65	-100.82
Sierra de Mil cumbres	K-Ar	14.10±0.70 Ma	Pasquarè et al. (1991)	19.65	-100.91
Andesita Sierra de Mil Cumbres	Ar-Ar	23.1±3.5 Ma	Pérez-Esquivias et al. (2010); Arce et al. (2012)	19.75722103	- 100.686467
Andesita Sierra de Mil Cumbres	Ar-Ar	21.5±0.1 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.6765464	- 101.153783
Domo La Escalera	Ar-Ar	23.0±0.37 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.61055	- 101.041269
Ignimbrita La Escalera	Ar-Ar	22.89±0.38 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.5837011	- 101.088924
Domo La Escalera	Ar-Ar	22.28±0.26 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.6088593	- 101.017362
Domo La Escalera	Ar-Ar	21.7±0.26 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.5831552	- 101.007377
Domo Atécuaro	Ar- Ar	19.4±0.39 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.6693142	- 101.141492

Lava Cuitzeo	Ar- Ar	18.689±0.281 Ma	Avellán et al. (2020)	19.7800845	- 101.312502
Lava Cuitzeo	Ar- Ar	18.318±0.149 Ma	Avellán et al. (2020)	19.8330562	- 101.213973
Ignimbrita Cuitzeo	Ar- Ar	17.424±0.012 Ma	Avellán et al. (2020)	19.794687	- 101.192964
Ignimbrita Cuitzeo	Ar-Ar	16.88±0.34 Ma	Trujillo-Hernández (2017)	19.8636758	- 101.333366
Ignimbrita Cuitzeo	Ar-Ar	16.88±0.22 Ma	Trujillo-Hernández (2017)	19.8783041	- 101.248597
Ignimbrita Cuitzeo	Ar-Ar	16.72±0.24 Ma	Trujillo-Hernández (2017)	19.8918481	- 101.301117
Ignimbrita Atécuaro basal color vino	Ar-Ar	16.76±0.22 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.6798397	- 101.158576
Ignimbrita La Escalera	Ar- Ar	16.25±0.5 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.6821943	- 101.008618
Ignimbrita Atecuaro color blanco	Ar- Ar	16.25±0.14 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.6688136	-101.13954
Ignimbrita Atécuaro color rosa-blanco	Ar-Ar	16.4±0.3 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.6637998	-101.1687
Ignimbrita Atécuaro	Ar-Ar	16.3±0.13 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.6668028	- 101.136977
Domo Atécuaro	Ar-Ar	16.31±0.16 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.6325549	-101.20123
Lava Punhuato	Ar- Ar	16.3±0.64 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.6960001	- 101.128683
C. El Caracol	Ar-Ar	8.26 ± 0.08 Ma	Trujillo-Hernández et al. (2022)	19.891719	-101.25595
Volcán Zapata	Ar-Ar	7.81 ± 0.30 Ma	Trujillo-Hernández (2017)	19.8994649	- 101.075448

Volcán Zapata	Ar-Ar	6.65 ± 0.10 Ma	Trujillo-Hernández (2017)	19.8491723	- 101.120059
Volcán Zapata	Ar-Ar	6.89 ± 0.12 Ma	Trujillo-Hernández (2017)	19.8878076	- 101.097505
Domo La Cruz	Ar- Ar	6.681±0.073 Ma	Avellán et al. (2020)	19.7379613	- 101.329349
Flujos de La Leonera	Ar-Ar	4.433±0.170 Ma	Kshirsagar et al. (2015)	19.8907222	- 101.556444
C. Zoromuta	Ar-Ar	3.8 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.436929	- 101.431899
Lava Cuto	Ar-Ar	3.724±0.057 Ma	Avellán et al. (2020)	19.7272869	-101.3404
Domo del Divisadero	Ar-Ar	3.144±0.3 Ma	Avellán et al. (2020)	19.6547709	- 101.295275
C. Tecolote	Ar-Ar	3.02±0.03 Ma	Trujillo-Hernández (2017)	19.8943184	- 101.370228
Lava Lagunillas	Ar-Ar	2.98±0.47 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.548031	- 101.415729
Domo Chapultepec	Ar-Ar	2.633±0.041 Ma	Osorio-Ocampo et al. (2018)	19.5556725	- 101.523634
Domo El Divisadero	Ar-Ar	2.6±0.73 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.511221	- 101.353921
Cono La Trampa	Ar-Ar	2.0±0.53 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.435778	101.375034
C. La Calavera	Ar-Ar	2.0 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.435445	101.384052
Domos Sta. Genoveva	Ar-Ar	1.9±0.22 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.477804	101.45747
Domos La Yerbabuena	Ar-Ar	1.6±0.62 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.516086	101.405112
Picacho	Ar-Ar	1.557±0.06 Ma	Kshirsagar et al. (2015)	19.8102778	- 101.392778
C. Pelón	Ar-Ar	1.545±0.127 Ma	Kshirsagar et al. (2015)	19.80525	- 101.453722

Depósito de caída Cuitzeo	Ar-Ar	1.480±0.016 Ma	Avellán et al. (2020)	19.8448327	- 101.157305
C. Blanco	Ar-Ar	1.47±0.34 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.481652	- 101.434534
Lava Quinceo	Ar-Ar	1.47±0.14 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.7567502	-101.22705
Ignimbrita La Cañada	Ar-Ar	1.471±0.061 Ma	Kshirsagar et al. (2015)	19.8529167	- 101.517139
Ignimbrita El Durazno	Ar-Ar	1.462±0.029 Ma	Kshirsagar et al. (2015)	19.8820278	- 101.511528
C. Unguarán	Ar-Ar	1.46±0.14 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.481271	- 101.476332
Lava Quinceo	Ar- Ar	1.365±0.010 Ma	Avellán et al. (2020)	19.7551085	- 101.257701
Lava Quinceo	Ar-Ar	1.355±0.017 Ma	Avellán et al. (2020)	19.7709824	- 101.205138
Cono Zimbicho	Ar-Ar	1.3±0.3 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.423356	- 101.478749
Domo El Caracol	Ar-Ar	1.282±0.64 Ma	Kshirsagar et al. (2015)	19.8104167	- 101.421139
Domo El Huracán	Ar-Ar	1.042±0.026 Ma	Osorio-Ocampo et al. (2018)	19.5878598	- 101.521458
Cono Iratzio	Ar-Ar	1.0±0.13 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.633524	101.404483
Cerro Chino	Ar-Ar	0.990±0.21 Ma	Pérez-Orozco et al. (2018)	19.686296	- 101.475088
Domo El Tzirate	Ar-Ar	0.961±0.029 Ma	Kshirsagar et al. (2015)	19.7241111	-101.50425
Domo El Tzirate	Ar-Ar	0.930±0.25 Ma	Pérez-Orozco et al. (2018)	19.728639	- 101.510672
Cono Buenavista	Ar-Ar	0.880±0.094 Ma	Osorio-Ocampo et al. (2018)	19.5507046	- 101.547504
El Águila	K-Ar	0.87±0.05 Ma	Pasquarè et al. (1991)	19.61	-101.4
Sanambo	K-Ar	0.87±0.05 Ma	Nixon et al. (1987)	19.6286111	- 101.429167

C. Pelón	Ar-Ar	0.844±0.099 Ma	Avellán et al. (2020)	19.7065673	- 101.321122
El Águila	Ar-Ar	0.72±0.08 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.624859	- 101.364132
C. El Burro	Ar-Ar	0.7±0.08 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.437957	- 101.513195
Cerro piedra Gorda	Ar-Ar	0.65 Ma	CFE (1985); Cardona-Melchor (2015)	19.43	-101.5
El Remolino	Ar-Ar	0.64±0.02 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.621979	- 101.337136
Tetillas	Ar-Ar	0.562±0.078 Ma	Avellán et al. (2020)	19.6968327	- 101.242216
Yahuarato	K/Ar	0.560±0.07 Ma	Delgado-Granados et al. (1995)	19.63	-101.55
Yahuarato	K-Ar	0.540±0.07 Ma	Ban et al. (1992)	19.6147222	- 101.551667
El Olvido	Ar-Ar	0.502±0.072 Ma	Osorio-Ocampo et al. (2018)	19.6150973	-101.51161
Chato	Ar-Ar	0.497±0.046 Ma	Osorio-Ocampo et al. (2018)	19.5209964	- 101.507399
La Taza	Ar-Ar	0.37±0.02 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.45153	- 101.440366
Los Puercos	Ar-Ar	0.37±0.02 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.457111	- 101.432434
Tetillas	Ar-Ar	0.36±0.08 Ma	Gómez-Vasconcelos et al. (2015)	19.7027002	- 101.223166
Coro Grande	Ar-Ar	0.347±0.013 Ma	Kshirsagar et al. (2015)	19.7596389	- 101.408306
Tetillas cono somital	Ar-Ar	0.336±0.008 Ma	Avellán et al. (2020)	19.7405704	- 101.295851
Tetillas domo somital	Ar-Ar	0.346±0.009 Ma	Avellán et al. (2020)	19.7402156	- 101.283341

C. Tacuache	Ar-Ar	0.301 Ma	Ruíz-Anduquia (2017)	19.41283	- 101.386057
C. Guadalupe	Ar-Ar	0.14±0.06 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.490538	- 101.351553
Cerritos Lavas	Ar-Ar	0.138±0.037 Ma	Avellán et al. (2020)	19.6632402	- 101.301087
Cerritos Lavas	Ar-Ar	0.114±0.029 Ma	Avellán et al. (2020)	19.6813742	- 101.300459
La Nieve	Ar-Ar	0.088±0.03 Ma	Cardona-Melchor (2015)	19.448016	- 101.418504
C. La Alberca		0.046 Ma	Ruíz-Anduquia (2017)	19.423636	- 101.395437
La Muela	Radiocarbono	32590 a	Osorio-Ocampo et al. (2018)	19.4971047	- 101.516954
Rancho Seco	Radiocarbono	30300 a	Osorio-Ocampo et al. (2018)	19.6214926	- 101.460494
Conos Cuanajo	Radiocarbono	28290 a	Cardona-Melchor (2015)	19.4713606	- 101.479527
Rancho Seco	Radiocarbono	27845 a	Ramírez-Uribe et al. (2019)	19.6215556	-101.4605
La Alberca	Radiocarbono	22350 a	Kshirsagar et al. (2015)	19.8230278	-101.465
Cono San Isidro	Radiocarbono	21490 a	Cardona-Melchor (2015)	19.518983	- 101.430267
La Alberca	Radiocarbono	20275 a	Kshirsagar et al. (2015)	19.7986667	- 101.446222
El Molcajete de Zipiajo	Radiocarbono	14710 a	Kshirsagar et al. (2015)	19.7833889	- 101.551528
C. Hueco	Radiocarbono	12570 a	Kshirsagar et al. (2015)	19.7116111	- 101.497694
El Melón	Radiocarbono	12415 a	Ramírez-Uribe et al. (2019)	19.6804444	- 101.421694
La Muela	Radiocarbono	11490 a	Osorio-Ocampo et al. (2018)	19.4906909	- 101.524244

El Melón	Radiocarbono	11470 a	Ramírez-Uribe et al. (2019)	19.6296389	- 101.450333
La Mina	Radiocarbono	10020 a	Kshirsagar et al. (2015)	19.7141111	- 101.451778
La Mina	Radiocarbono	7045 a	Kshirsagar et al. (2015)	19.7174167	- 101.444972
Derrames Tendeparacua	Radiocarbono	6105 a	Kshirsagar et al. (2015)	19.8848056	- 101.450083
C. Los Lobos	Radiocarbono	6015 a	Comunicación personal, C. Siebe, en Osorio-Ocampo et al. (2018)	19.504118	- 101.547903
El Frijol	Radiocarbono	3230 a	Osorio-Ocampo et al. (2018)	19.4963341	- 101.537853
El Frijol	Arqueomagnético	3906 a	García-Quintana (2016)	19.4559944	- 101.548472