



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN GEOGRAFÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

**ANÁLISIS DEL RIESGO POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN
MASA EN AMBIENTES VOLCÁNICOS: EL ESTRIBO, PÁTZCUARO,
MICHOACÁN, MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTORA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
GEMMA GÓMEZ CASTILLO

TUTORES PRINCIPALES:
DR. MANUEL EDUARDO MENDOZA CANTÚ
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL, UNAM
DR. JOSÉ LUIS MACÍAS VÁZQUEZ
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNIDAD MICHOACÁN, UNAM

MIEMBRO DEL COMITÉ TUTOR:
DR. LUIS MIGUEL MORALES MANILLA
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL, UNAM

Morelia, Michoacán. Febrero de 2020.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria

A mí adorado esposo Nico:

Por ser el sol y motor de mi vida, por toda la felicidad que nos has traído a mí y a nuestros bebés. Te dedico esta tesis porque eres parte clave de este logro, porque tu alegría y tu vivacidad han alentado este camino y sin ti, esto no sería posible. Gracias por tu apoyo, paciencia y amor. Gracias por ser el mejor padre para Toba y Titán.

Te amamos infinitamente.

Eres el amor de mi vida.

Para Luis Javier, Vianney, Juan, Conchí y mamá Ju...

...Por todo lo que hemos compartido juntos.

Agradecimientos

Un profundo y total agradecimiento a mi asesor, el Dr. Manuel E. Mendoza Cantú, por su gran calidad humana. Mil gracias por su tiempo, su apoyo, sus consejos, su disponibilidad, pero sobre todo, por su infinita paciencia conmigo (¡vaya que la necesité!).

Gracias totales a mi asesor, el Dr. José Luis Macías, quién me acercó al fascinante mundo de la vulcanología, gracias por todas las enseñanzas y el tiempo dedicado a mi trabajo y a mi aprendizaje. Es usted mi ídolo académico.

Infinito agradecimiento al Dr. Luis Miguel Morales Manilla, guía y gurú de este trabajo en el aspecto de la vulnerabilidad. También muchas gracias a la Dra. Erna López Granados, quien fungió como miembro de mi comité Tutoral durante tres semestres y sus comentarios ayudaron siempre a mejorar la calidad de este trabajo. Gracias también a la Dra. Teresa Ramírez, quien fue mi asesora durante el primer semestre del doctorado y de quien obtuve invaluable conocimientos.

A mis evaluadores del Examen de Candidatura: El Dr. Luis Miguel Morales Manilla, Dr. Jesús Manuel Macías Medrano y Dr. Jesús Arturo Muñiz Jauregui. Muchas gracias por sus aportaciones y comentarios.

A mis sinodales: A las queridas Doctoras Berenice Solís Castillo y Erna López Granados y los apreciados Doctores Luis Miguel Morales Manilla, Jesús Manuel Macías Medrano y José Ramón Hernández Santana. Mi eterna gratitud y reconocimiento por las correcciones y mejoras a este trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México.

Al CONACyT, por la beca doctoral. Gracias también al proyecto “Evaluación de la importancia relativa de bosque húmedo de niebla bajo un enfoque de paisaje” (0179386) por el apoyo económico para el trabajo de campo.

Al Posgrado en Geografía, pero más especialmente, al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.

Al Dr. Pedro Urquijo, amigo indiscutible y (ex)coordinador de Docencia. A Ruth Mora y Cristina Valdés, asistentes de Docencia. A Fabiola Vázquez, que salvó la vida de mi computadora en más de una vez. A Antonio Navarrete, por su apoyo técnico y la batería del dron que murió. A la nueva jefa de docencia, la Dra. Sara Barrasa García, por su apoyo y orientación en los trámites de titulación.

A las personas que contribuyeron a la realización de este trabajo: Nico Vargas, Paz Pérez, Dr. Luis Miguel Morales y Dr. Jaime Paneque (vuelos Dron), Nico Vargas (procesamiento de fotografías), Vianey Solorio (aplicación de encuestas), Antonio Pola, Susana Osorio y Laura García (trabajo geológico), Karla De La Peña y Rosario

Vázquez (simulaciones con Titan2D), a los jefes de tenencia y líderes de las comunidades que tan amable y desinteresadamente me compartieron sus conocimientos.

A mi amada y hermosa familia, a quienes llevo siempre en mi corazón y en mi mente. Luis Javier, María Vianney, Juan Pablo, Conchita, mamá Ju y Jorge, gracias por aguantar y avanzar conmigo, los amo infinitamente. A mi tío Juan. Gracias a mis bendiciones: Toba Vargas Gómez y Titán Vargas Gómez, mis amados hijos felinos sin los cuales hubiera perdido la cordura antes de terminar esta travesía. A mamá Angelita, mi querida suegra, que me adoptó como parte de su familia y a quien respeto y admiro con todo mi corazón. A mi querida familia de Fuente Flores, los amo, ustedes son geniales.

Agradecimientos especiales a mi esposo, amigo y cómplice de aventuras, Nicolás Vargas Ramírez, eres todo lo bueno que esperaba que me pasara en la vida. Mil gracias mi amor.

A mis queridos amigos y compañeros de aventuras y desventuras: Xóchitl Torres, Porfirio Avilés, Sara Barrasa, Jaime Paneque, Araceli Benítez, Paz Pérez, Karla De La Peña, Selene Cruz, Irene Pérez, América Navarro, Mariana Vallejo, Karine Lefebvre, Pedrito Gómez, Alina Álvarez y Ana Merlo. A todos los compañeros y amigos académicos, de convivencia y fiesta, que son muchos y muy variados. A los meme-lovers y al escuadrón felino. A todos los amigos entrañables del CIGA, la ENES y el IIES.

The End

A la querida memoria de:

Mtro. Francisco Suárez Vidal

Ejemplo de calidad humana y académica.

Ricardo Alejandro Godoy Gómez

Vives siempre en mi corazón.

Índice

Índice de figuras.....	IV
Índice de tablas.....	VIII
Resumen/Abstract.....	X
Capítulo I.- Introducción general.....	1-I
I.1 Antecedentes.....	2-I
I.2 Planteamiento del problema.....	3-I
I.3 Justificación.....	4-I
I.4 Supuestos de trabajo-hipótesis.....	6-I
I.5 Objetivos.....	6-I
I.5.1 Objetivo general.....	6-I
I.5.2 Objetivos particulares.....	6-I
I.6. Localización y generalidades.....	7-I
I.6.1 Contexto geológico.....	10-I
I.6.1.1 Faja Volcánica Trans-Mexicana.....	10-I
I.6.1.2 Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato.....	11-I
I.6.2 Contexto geomorfológico.....	12-I
I.6.3 Contexto geográfico.....	13-I
I.7 Estructura de la investigación.....	13-I
I.8 Bibliografía.....	14-I
Capítulo II. Marco conceptual. Peligro, vulnerabilidad y riesgo por vulcanismo y sus fenómenos asociados.....	1-II
II.1 Definición de fenómeno natural.....	1-II
II.2 ¿Cuándo un fenómeno natural se convierte en peligro natural?.....	1-II
II.3 ¿Qué es un desastre natural?	2-II
II.4 Riesgo volcánico: Estado del Arte y desafíos de trabajo (artículo publicado)	
II.4.1 Abstract.....	2-II
II.4.2 Introducción.....	4-II
II.4.3 Conceptos principales de riesgo volcánico.....	5-II
II.4.3.1 Peligro volcánico.....	5-II
II.4.3.1.1 Peligros volcánicos primarios.....	10-II
II.4.3.1.2 Peligros volcánicos secundarios.....	10-II
II.4.3.2 Vulnerabilidad.....	11-II
II.4.3.3 Riesgo volcánico.....	13-II
II.4.3.4 Desastre volcánico.....	13-II
II.4.4 Revisión cuantitativa de la literatura del riesgo volcánico.....	14-II
II.4.4.1 Metodología.....	14-II
II.4.4.2 Resultados.....	16-II
II.4.4.3 Perspectivas y retos de trabajo.....	24-II
II.4.5 Conclusiones.....	30-II
II.4.6 Agradecimientos.....	31-II
II.5 Los procesos de remoción en masa.....	31-II

II.5.1 Caídas o desprendimientos.....	32-II
II.5.2 Vuelcos o desplomes.....	32-II
II.5.3 Deslizamientos.....	33-II
II.5.4 Expansiones laterales.....	33-II
II.5.5 Flujos.....	34-II
II.5.6 Movimientos complejos.....	34-II
II.6 Bibliografía.....	35-II

Capítulo III. Detailed geomorphology of debris avalanches of El Estribo volcanic complex (Central Mexico). (Artículo aceptado en la revista Journal of Maps).....1-III

Abstract.....	2-III
III.1. Introduction.....	2-III
III.2. Tectonic, geographic, and geological contexts.....	3-III
III.3. Materials and methods.....	5-III
III.4. Results.....	6-III
III.4.1 Hypsometric map.....	6-III
III.4.2 Relief energy map.....	7-III
III.4.3 Slope map.....	8-III
III.4.4 Potential mass movement map.....	8-III
III.4.5 Distribution and characteristics of hummocks.....	8-III
III.4.6 Geomorphological map.....	10-III
III.5. Summary and conclusions.....	12-III
III.6. Software.....	13-III
III.7. Data.....	14-III
III.8. Acknowledgements.....	14-III
III.9. Map Design.....	14-III
III.10. References.....	14-III
III.11. Main map.....	20-III

Capítulo IV. Peligrosidad por procesos de remoción en masa.....1-IV

IV.1 Resumen.....	1-IV
IV.2 Introducción.....	1-IV
IV.3 Materiales y métodos.....	3-IV
IV.4 Resultados.....	8-IV
IV.4.1 Determinación de peligro por caída de rocas.....	8-IV
IV.4.2 Simulaciones de avalanchas de escombros.....	10-IV
IV.4.3 Otros PRM asociados a altas pendientes.....	18-IV
IV.5 Discusión.....	19-IV
IV.6 Conclusiones.....	25-IV
IV.7 Bibliografía.....	26-IV

Capítulo V. Vulnerabilidad y riesgo por procesos de remoción en masa en el complejo volcánico El Estribo, Pátzcuaro, Michoacán, México.....1-V

V.1 Resumen.....	2-V
V.2 Palabras clave.....	2-V
V.3 Introducción.....	3-V

V.3.1 Contexto geológico y tectónico del Complejo Volcánico El Estribo (CVE).....	5-V
V.4 Materiales y métodos.....	7-V
V.4.1 Determinación de la Peligrosidad.....	7-V
V.4.2 Análisis de la vulnerabilidad.....	11-V
V.4.2.1 Encuestas.....	12-V
V.4.2.2 Entrevistas a líderes de comunidades.....	13-V
V.4.2.3 Modelo SAVE.....	14-V
V.4.3 Análisis ponderado del riesgo.	15-V
V.5 Resultados y discusión.....	15-V
V.5.1 Índice de vulnerabilidad.	15-V
V.5.2 Índice de riesgo.....	19-V
V.6 Conclusiones y recomendaciones.....	24-V
V.7 Referencias.....	25-V
Capítulo VI. Conclusiones generales.....	1-VI
Anexo I. Ejemplo de la encuesta aplicada a la población.....	1-A

Índice de figuras

Capítulo I

	Página
Figura 1. Localización de la zona de estudio en imagen satelital. El volcán el Estribo se ubica dentro del CVMG (límites tomados de Mazzarini et al, 2010) y éste a su vez dentro de la FVTM (límites tomados de Ferrari et al, 2012).	4-I
Figura 2. Localización de la zona de estudio dentro del municipio de Pátzcuaro y su colindancia con otros municipios de Michoacán.	9-I
Figura 3. Ubicación de las localidades rurales en las que se centra este estudio.	10-I

Capítulo II

Figura II-1. Número de publicaciones por año.	16-II
Figura II-2. a) Número de autores por artículo. b) Autores con mayor número de publicaciones respecto al riesgo volcánico.	17-II
Figura II-3. Número de publicaciones por revista.	18-II
Figura II-4: a) Número de menciones por institución. b) Países a los que pertenecen las instituciones.	18-II
Figura II-5: Países en los que se encuentra adscrito el primer autor.	19-II
Figura II-6: Principales escalas de estudio reportadas en los artículos. FVTM= Faja Volcánica Trans-Mexicana.	20-II
Figura II-7. a) Número de publicaciones por localización de volcanes en los distintos continentes. b) Ubicación por país de los volcanes reportados en los artículos.	20-II
Figura II-8. 116 artículos delimitaron algún área de estudio en sus trabajos, a partir de ellos se crearon 56 distintas categorías, reagrupadas en 14 clases para elaborar esta gráfica.	21-II
Figura II-9. Número de trabajos por grupo, de acuerdo al principal enfoque usado para llevar a cabo su análisis.	22-II
Figura II-10. Principales tipos de peligros reportados en los artículos.	23-II
Figura II-11. Enfoques en el análisis de la vulnerabilidad para los distintos trabajos.	24-II
Figura II-12. a) Comparación entre las publicaciones sobre riesgo volcánico (datos de este trabajo) y las erupciones volcánicas anuales (tomado del Global Volcanism Program GVN, 2013). b) Las publicaciones son la suma del año en cuestión y un año previo, para determinar si existe alguna relación más directa con el número de erupciones, ya que las publicaciones generalmente no son inmediatas.	25-II

Capítulo III

Figure 1: a) Perspective view from the eastern scarp of El Estribo. The Pátzcuaro Lake and the island of Janitzio (scoria cone) appear in the background to the right. b) View from the south of the El Estribo cinder cone (photographs of Gemma Gómez-Castillo).	3-III
Figure 2: Graphs showing the rainfall variables of the study area during a period of 43 years between 1969 and 2016. a) Annual rainfall. b) Average monthly rainfall. Data from CONAGUA,2017, weather station 16087 “Pátzcuaro”, located at 19.516389° latitude, -101.609722° longitude.	4-III
Figure 3: a) Location of the study area within the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB) and b) the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (MGVF). c) Location of the study area to the south of Lake Pátzcuaro. The limits of the TMBV were taken from Ferrari et al. (2012) and those of the MGVF, from Mazzarini et al. (2010). The white lines represent state limits.	5-III
Figure 4: Thematic maps of the study area: a) Hypsometric, represented by stretch values along a color ramp, four standard deviations type, b) Relief energy, grid of 200 x 200 meters, c) Slope and d) Potential mass movement.	7-III
Figure 5: Location, distribution, volume, and length of major axis of hummocks in the study area. The numbers next to the hummocks correspond to their identifiers (Id) in table 1.	9-III
Figure 6: Mosaics of high resolution images obtained from drone flights. The areas outside of the red polygon are references of the contrast in resolution of the information previously available for the study area. a) Hillshade model; b) Rectified orthophotographs.	11-III

Capítulo IV

Figura 1: Ubicación de fallas y fracturas cercanas a la zona de estudio, asociadas al sistema de fallas Pátzcuaro – Acambay (Mendoza-Ponce et al., 2018). Estructuras geológicas tomadas de Garduño-Monroy et al. (2009a) y conjunto de datos vectoriales geológicos, escala 1:250,000, carta E14-1, producidos por INEGI (1983).	3-IV
Figura 2: Interfaz gráfica del programa Titan2D, donde se muestran las ventanas usadas para ingresar los parámetros necesarios para las simulaciones.	5-IV
Figura 3: Modelo Digital del Terreno de la topografía aproximada existente hace 28,000 años, antes de la ocurrencia de la primera avalancha de escombros. Se muestran las localidades y la actual línea del lago como referencias.	8-IV
Figura 4: Ubicación de las principales características encontradas en los recorridos de campo. Imagen satelital de fondo: Esri World Imagery.	9-IV
Figura 5: a) Diagrama de puntos de los datos de fracturas tomados en campo. b) Diagrama de contornos basado en los datos del diagrama de puntos a. Diagramas elaborados en el programa Stereo32, versión libre.	10-IV

Figura 6: Simulación de la avalancha de escombros ocurrida hace ~28,000 años, con el escarpe y el MDT reconstruido. Las localidades y el lago se ilustran como referencia.	11-IV
Figura 7: Localización de los puntos de partida de las avalanchas simuladas y áreas de las pilas en sus diversos escenarios.	12-IV
Figura 8: Resultados de las simulaciones hechas en Titan2D, para los puntos de partida 1 y 2.	14-IV
Figura 9: Resultados de las simulaciones hechas en Titan2D, para los puntos de partida 3 y 4.	15-IV
Figura 10: Resultados de las simulaciones hechas en Titan2D, para los puntos de partida 5 y 6.	16-IV
Figura 11: Localización de los perfiles topográficos y sus respectivas avalanchas de escombros.	17-IV
Figura 12: Perfiles topográficos y su peligrosidad por espesor del depósito. Los colores se corresponden con los de la figura 11. PP es el punto de partida de la simulación de avalancha, el triángulo negro señala por donde pasa la carretera libre Pátzcuaro-Uruapan, el triángulo azul indica donde comienza el lago de Pátzcuaro.	18-IV
Figura 13: Pequeñas áreas con árboles inclinados en dirección de la pendiente, los cuales nos indicarían procesos de reptación.	19-IV
Figura 14: Estimación del volumen de los depósitos de las avalanchas de escombros calculados a partir del MDT actual y probable área colapsada en la avalancha de escombros ocurrida hace 28,360 ±170 años antes del presente (Pola <i>et al.</i> , 2014a).	21-IV
Figura 15: Mapas de peligro por avalanchas de escombros que muestran los distintos niveles de peligro de acuerdo a las alturas de los depósitos obtenidas en las simulaciones realizadas con Titan2D. a) Avalancha 1 “Este”. b) Avalancha 3 “Centro”. c) Avalancha 5 “Oeste”. d) Unión o mosaico de las 3 avalanchas anteriores, considerando el máximo valor de espesor en las celdas que se superponían, esta unión es la que se usa para la evaluación del riesgo. La simbología que se muestra en la parte inferior es válida para los cuatro mapas de peligros.	23-IV

Capítulo V

Figura 1: a) Localización de la zona de estudio dentro del CVMG y de la FVTM en la parte central de México. b) Ubicación de fallas y fracturas cercanas a la zona de estudio, asociadas al sistema de fallas Pátzcuaro–Acambay (Mendoza-Ponce <i>et al.</i> , 2018). Estructuras geológicas tomadas de Garduño-Monroy <i>et al.</i> (2009) y conjunto de datos vectoriales geológicos, escala 1:250,000, carta E14-1, producidos por INEGI (1983).	7-V
Figura 2: Mapas de niveles de peligro de acuerdo a las alturas de depósitos obtenidas con las simulaciones de avalanchas realizadas en Titan2D. a) Avalancha 1 “Este”. b) Avalancha 2 “Centro”. c) Avalancha 3 “Oeste”. d) Unión o mosaico de las diferentes zonas de peligro de las tres simulaciones anteriores, considerando el máximo valor de la altura del depósito en las	10-V

celdas que se superponían. Este mapa compuesto fue usado para la evaluación del riesgo. La simbología de la parte inferior es general para los 4 mapas.

Figura 3: Ubicación de las localidades de interés. Se muestran los puntos donde fueron aplicadas las encuestas y las localidades donde se logró entrevistar al jefe de tenencia o líder de la comunidad. El buffer de 300 metros fue delimitado a partir de la línea azul (escarpe de la falla Pátzcuaro). 12-V

Figura 4: Elementos de la zona de estudio, la leyenda inferior es general y corresponde a los 4 mapas. Buffer 300m es el área de la ciudad de Pátzcuaro que es analizada en este trabajo. a) Población. Los números junto a las localidades indican la cantidad de habitantes, fuente: Censo Nacional de Población y Vivienda, INEGI (2011). b) Infraestructura y equipamiento del área de estudio. Fuente: Censo Nacional de Población y Vivienda, INEGI (2011). c) Actividades económicas respecto al uso de suelo. Ubicación puntual de unidades económicas, fuente: DENU, INEGI (2018). d) Recursos naturales con respecto al uso de suelo. Polígono del Área Natural Protegida de categoría estatal, fuente: CONABIO (2016). 16-V

Figura 5: Vulnerabilidad por sensibilidad frente al peligro (grado de resistencia ante cualquier evento de peligro) de los componentes principales de este sistema; la leyenda inferior es general y corresponde a los 4 mapas. Buffer 300m es el área de la ciudad de Pátzcuaro que es analizado en este trabajo. a) Nivel de sensibilidad con respecto al porcentaje de personas menores de 15 años. b) Nivel de sensibilidad con respecto al porcentaje de personas mayores de 65 años. c) Nivel de sensibilidad de la población con respecto a los dos grupos de edades. d) Nivel de sensibilidad de la infraestructura y equipamiento del área de estudio. 17-V

Figura 6: a) Vulnerabilidad por sensibilidad de las actividades económicas. Fuente de los datos puntuales: DENU, INEGI (2018). b) Vulnerabilidad por sensibilidad de los recursos naturales. Fuente del polígono del Área Natural Protegida de categoría estatal: CONABIO (2016). c) Niveles de vulnerabilidad por resiliencia en base a la accesibilidad de la población a los servicios de salud. Fuente: INEGI (2011). d) Niveles de vulnerabilidad por resiliencia de la población en base a su nivel de marginación. Fuentes: Información por localidad: CONAPO (2010b). Información por AGEB urbana: CONAPO (2010a). 19-V

Figura 7: a) Riesgo ocasionado por la vulnerabilidad por exposición en base a la densidad de población. b) Riesgo debido a la vulnerabilidad por sensibilidad de la población en base a sus características de edad. c) Riesgo de la población en base a su vulnerabilidad por resiliencia por acceso a servicios de salud. d) Riesgo de la población en base a vulnerabilidad por resiliencia debida a sus condiciones de marginación. 21-V

Figura 8: a) Riesgo de la infraestructura y el equipamiento en base a la vulnerabilidad por exposición y el nivel de vulnerabilidad por sensibilidad. b) Riesgo de las actividades económicas basado en la vulnerabilidad por exposición y el nivel de vulnerabilidad por sensibilidad. c) Riesgo de los recursos naturales en base a la vulnerabilidad por exposición y el nivel de 22-V

vulnerabilidad por sensibilidad. d) Percepción del riesgo por parte de la población, de acuerdo a las respuestas de la encuesta aplicada en la zona de estudio.

Índice de tablas

Capítulo I

	Página
Tabla 1: Localidades en las que se ha centrado el estudio de la vulnerabilidad. ID: clave con la se identifican las poblaciones en el mapa de la figura 3. Población tomada de INEGI, 2015.	8-I

Capítulo II

Tabla II-1: Los peligros volcánicos	6-II
Tabla II-2: Estructura y arreglo de la información recabada de los artículos.	14-II
Tabla II-3: Artículos enfocados en el peligro volcánico y algunas temáticas relacionadas.	26-II
Tabla II-4: Principales temáticas en las que se enfocan los artículos revisados.	27-II
Tabla II-5: Otros enfoques en los cuales basaron sus estudios algunos artículos.	29-II

Capítulo III

Table 1: Morphological characteristics of hummocks. Id: Identifier of hummock. Area (m ²): The area in square meters of each hummock calculated in two dimensions. Perimeter (m): Length in meters of the hummocks' contour. Height: The reference contour line value in meters from which the hummocks' volumes were calculated. Volume (m ³): The space in cubic meters occupied by each hummock calculated from the next lower contour line (Height). Superficial area (m ²): The surface area in square meters of each hummock calculated in three dimensions. Length (major axis m): The length in meters of the major axis of each hummock. Strike (°): Direction or bearing relative to true north in degrees of the major axis of each hummock.	10-III
---	--------

Capítulo IV

Tabla 1: Parámetros de entrada usados en el programa Titan2D para llevar a cabo la primera simulación de una avalancha de escombros.	6-IV
--	------

Tabla 2: Parámetros de entrada de las distintas simulaciones de avalanchas de escombros para la falla Pátzcuaro. Los puntos y las pilas se corresponden con los mostrados en la figura 6. 13-IV

Tabla 3: Superficies abarcadas por cada rango de altura de depósito para los distintos puntos de partida de las simulaciones de avalanchas de escombros. Mm²= millones de metros cuadrados. 13-IV

Tabla 4: Sismicidad histórica de la zona de Pátzcuaro y centro de Michoacán. Fuentes: a) Catálogo histórico sobre fenómenos naturales asociados a catástrofes sociales en Michoacán, 1454-1985 (Carreón y Trejo Barajas, 1985); b) Los sismos en la historia de México (García Acosta y Suárez Reynoso, 1996); c) <http://sismohistoricos.org> (García Acosta y Suárez Reynoso, 2014); d) <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (USGS, 2016). 24-IV

Capítulo V

Cuadro 1: Parámetros de entrada en el programa Titan2D. 1= Coordenadas del punto de partida para la simulación de la avalancha (UTM, zona 13N). 2= Altura de la pila, en metros. 3= Longitud del eje mayor, en metros. 4= Longitud del eje menor, en metros. 5= Orientación del eje mayor. 6= Volumen calculado, expresado en millones de metros cúbicos. 8-V

Cuadro 2: Población total de las localidades de interés para este estudio. Colonias de Pátzcuaro se refiere a los habitantes de la ciudad de Pátzcuaro que se asientan cercanos al escarpe de falla. *Dato usado para determinar el tamaño de muestra para la aplicación de las encuestas. Fuente: Censo de INEGI (2011). 11-V

Resumen

El complejo volcánico El Estribo, ubicado al sur del lago Pátzcuaro, forma una elevación integrada por un volcán en escudo coronado por un cono de ceniza. Dos avalanchas de escombros, con fecha de 28,000 y 14,000 años antes del presente, fueron probablemente provocadas por terremotos tectónicos asociados a la falla de Pátzcuaro. Los depósitos de las avalanchas de escombros cubren un área de 4 km² con una topografía típica de montículos. La zona es un área natural protegida, de categoría estatal, que no cuenta con estudios de vulnerabilidad y riesgo por procesos de remoción en masa.

En esta tesis se presenta una evaluación y modelamiento del riesgo desde una perspectiva geográfico-espacial por eventos geológicos asociados a ambientes volcánicos en El Estribo. Lo anterior fue llevado a cabo mediante una profunda revisión teórica y conceptual del estado del arte respecto al riesgo volcánico y sus peligros asociados, lo cual permitió comprender el comportamiento y disparadores de los procesos de remoción en masa en ambientes volcánicos, para concebirlos como peligro e insumo del riesgo. Luego, se elaboró un mapa geomorfológico detallado de la zona, realizado a partir de vuelos con drones y exhaustivo trabajo de campo, el cual fue trascendental para la comprensión de los procesos exógenos, cómo se relacionan estos con los procesos endógenos en un área tectónicamente activa y el rol que juega la sociedad al respecto. Posteriormente, se evaluó y plasmó la información geológica en los mapas de peligros y se simuló avalanchas de escombros mediante el programa TITAN 2D para conocer el probable comportamiento y afectaciones que estos fenómenos pudieran llegar a tener, lo cual determinó los niveles de exposición y peligrosidad en el área. A continuación, para la evaluación de la vulnerabilidad se emplearon distintas herramientas, como el análisis de la información censal de la población, la aplicación de encuestas entre los habitantes, se hicieron entrevistas a los líderes de las comunidades y se aplicó la metodología SAVE. Finalmente, para el análisis del riesgo, se conjugaron los resultados de la peligrosidad y la vulnerabilidad evaluadas previamente y se plasmaron los resultados en los mapas de riesgo, con los cuales cierra este trabajo.

Se concluye que el factor del peligro es inamovible e intrínseco de la zona, por tanto, para reducir el riesgo lo que corresponde es aminorar la vulnerabilidad. En el caso de El Estribo, la vulnerabilidad puede reducirse incrementando el número de personas con acceso a servicios de salud, disminuyendo el nivel de marginación de la población, pero, sobre todo, llevando a cabo una concientización y preparación de las personas respecto a los peligros a los que están expuestas.

Finalmente, se recomienda evitar que se siga urbanizando cerca del escarpe de falla y se exhorta a que se amplíe el polígono del área natural protegida de categoría estatal que allí existe, para que con ello se limite el uso de suelo a conservación.

Abstract

The El Estribo volcanic complex, located to the south of Pátzcuaro Lake, forms an elevation based on a shield volcano crowned by a cinder cone. Two debris avalanches, dated at 28,000 and 14,000 ybp, cover an area of 4 km² with a typical hummocky topography. The zone is a state natural protected area without studies of hazard and risk from mass movement processes.

This study presents an assessment and risk modeling from a geographical-spatial perspective due to geological events associated with volcanic environments in El Estribo. The foregoing was carried out through a thorough theoretical and conceptual review of the state of the art regarding volcanic risk and its associated hazards, which allowed us to understand the behavior and triggers of mass removal processes in volcanic environments, to conceive them as danger and Risk input. Then, a detailed geomorphological map of the area was prepared, made from flights with and exhaustive field work, which was transcendental for the understanding of exogenous processes, how they relate to endogenous processes in a tectonically active area and the role that society plays in this regard. Subsequently, the geological information was evaluated and reflected in the hazard maps and debris avalanches were simulated with the TITAN 2D code to define the probable behavior and effects that these phenomena could have, which determined the levels of exposure and danger in the area. Next, different tools were used to assess vulnerability, such as the analysis of population census information, the application of surveys among the inhabitants, interviews with community leaders and SAVE methodology. Finally, for the risk analysis, the results of the dangerousness and vulnerability previously evaluated were combined and the results were reflected in the risk maps, with which this work closes.

It is concluded that the danger factor is immovable and intrinsic in the area, therefore, to reduce the risk the vulnerability should be reduce too. In the case of El Estribo, vulnerability can be reduced by increasing the number of people with access to health services, reducing the level of marginalization of the population, but above all, by raising awareness and preparing people about the dangers to those who are exposed.

Finally, it is recommended avoiding further development near the fault escarp and to protect the extension of the present county protected natural area that exists, so that the use of land is limited to conservation.



CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN GENERAL

**Tesis:
Análisis del riesgo por procesos de remoción en masa
en ambientes volcánicos: El Estribo, Pátzcuaro,
Michoacán, México**



Capítulo I: Introducción General

Los movimientos del terreno en ambientes volcánicos están condicionados por la naturaleza de la roca volcánica, que suele estar muy fracturada, en forma granular, rica en arcilla y saturada de agua, esto debido a que los volcanes tienen sistemas hidrotermales y magmáticos propios, los cuales tienen un fuerte control sobre los movimientos del terreno y las avalanchas de escombros volcánicas (Ui, 1983; Siebert, 1984; 1996; Pola *et al.*, 2012). En consecuencia, los movimientos del terreno en ambientes volcánicos tienden a transformarse en grandes flujos de detritos, con lo cual aumenta la complejidad y afectaciones de estos fenómenos, a diferencia de lo que sucedería en otros ambientes (van Wyk de Vries y Delcamp, 2015).

En México, el vulcanismo se concentra en la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), también llamada Cinturón Volcánico Trans-Mexicano o Sistema Volcánico Transversal, la cual se localiza en la parte central del país, tiene una longitud aproximada de 1000 km y abarca desde el Golfo de California hasta el Golfo de México (Newton *et al.*, 2005; Garduño-Monroy y Macías, 2010). Esta faja se encuentra sobre la placa de Norteamérica, la cual es subducida en la parte occidental por las placas de Cocos y Rivera (Ferrari *et al.*, 2012).

Dentro de la FVTM ocurren zonas con una alta concentración de volcanes que coexisten en tiempo y espacio, conocidas como campos volcánicos. En la parte centro occidental de la FVTM se encuentra el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) que contiene unos 1300 edificios y estructuras volcánicas (Hasenaka, 1994; Hasenaka *et al.*, 1994).

Casi el 50% de la población mexicana, (un aproximado de 55 millones de personas) reside cerca o en los flancos de un volcán (Macías, 2012) por este motivo, las investigaciones científicas deben estar enfocadas a elaborar mapas de peligro de los volcanes activos, mapas que se elaboran mediante el estudio de la historia eruptiva, los procesos geoquímicos y petrológicos del magma y su ascenso hacia el exterior (Macías, 2005). Por otro lado, en el aspecto de la vulnerabilidad, es de vital importancia conocer la cantidad de gente que está expuesta, así como los bienes, servicios, infraestructura y recursos ambientales que se verían afectados ante la ocurrencia de evento volcánico de

magnitudes mayores; esto se complementa con la difusión de la información geológica, volcánica y de protección civil que debe ser entregada a la población.

I.1 Antecedentes

Los primeros registros con que se cuenta en México en referencia al vulcanismo activo fueron elaborados por los nahuas, plasmándolos en los códices, dónde se representaba a los volcanes como un cerro coronado por humo. El mejor registro de este tipo pertenece al Popocatépetl, que significa en lengua náhuatl “La montaña que humea”. Por su parte, los aztecas registraron la ocurrencia de erupciones en los años de 1363, 1509, 1512 y 1519-1528 (Macías, 2005).

A inicios del siglo XIX comenzaron en México los estudios científicos de volcanes activos. El primero de estos trabajos fue el de Humboldt en 1804 (Urquijo-Torres, 2007) , posteriormente los geólogos Del Río en 1842, Sánchez en 1856 y Del Castillo en 1870. A finales de ese siglo, Ordoñez, uno de los geólogos más prestigiados de nuestro país en esos años, realizó investigaciones de los grandes volcanes de México y, con descripciones generales sobre sus formas, resaltó las enormes diferencias que existen entre estos y también cuestionó de manera aguda, la contemporaneidad y la génesis común entre ellos (Macías, 2005).

Un hecho que cambiaría la historia de la vulcanología en México sucedió el 20 de febrero de 1943, aproximadamente a las 4:30 pm, cuando, en un campo de cultivo de maíz de la localidad de Paricutín, Michoacán, comenzó el nacimiento de un volcán. Ese pequeño volcán, al cual se nombró Paricutín, se convirtió en el volcán más estudiado de nuestro país en esas épocas; su actividad fue seguida muy de cerca por vulcanólogos de todo el mundo, a pesar de la incertidumbre que en esas fechas producía la segunda guerra mundial. El Paricutín cesó su actividad el 4 de marzo de 1952, con una altura final de 424m y dejó sepultados a los poblados de Paricutín y San Juan Parangaricutiro (San Juan de las Colchas) (Foshag y González-Reyna, 1956; Luhr *et al.*, 1993; Macías, 2005; Sánchez Caballero, 2010).

Respecto al colapso de los edificios volcánicos, en México los primeros estudios los realizaron Luhr y Carmichael (1982), Vincent *et al.* (1983) (citados por Robin y Boudal, 1987), Siebert (1984), Robin y Boudal (1987) y Luhr y Prestegaard (1988), teniendo como

objetivo la identificación y estudio de avalanchas de escombros en los volcanes de Colima y Popocatepetl. Una revisión de dichos colapsos en México fue presentada por Capra *et al.* (2002) en donde se mencionan varios eventos ocurridos en Michoacán incluido el Volcán El Estribo. Cerca de la zona de estudio, se han realizado numerosos trabajos enfocados principalmente a datar los volcanes y sus estructuras adyacentes (Hasenaka y Carmichael, 1985; Newton *et al.*, 2005; Pola *et al.*, 2014), cartografiarlos por diversos métodos (Johnson y Harrison, 1990), caracterizarlos geológicamente (Connor, 1987; Hasenaka, 1994; Macías, 2005) y determinar los peligros de las áreas circundantes (Isradé-Alcántara *et al.*, 2005; Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Garduño-Monroy *et al.*, 2011). En lo que respecta al manejo, gestión y mitigación de riesgos, sólo se tiene el Reglamento de Protección Civil (Gobierno, 2016) en el cual se menciona que se debe requerir y supervisar la expedición de un Atlas de Riesgo del municipio de Pátzcuaro, sin embargo, este último no está disponible ya que no ha sido llevado a cabo.

I.2 Planteamiento del problema

En el CVMG se encuentran varios volcanes que presentan el colapso parcial de su edificio o estructura volcánica, uno de éstos es el volcán El Estribo, de edad del Pleistoceno tardío, ubicado al sur del Lago de Pátzcuaro (Pola *et al.*, 2014; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018). El punto más alto del volcán El Estribo se localiza a 2430 msnm, en las coordenadas 19°30'41.95"N y 101°38'31.04"O.

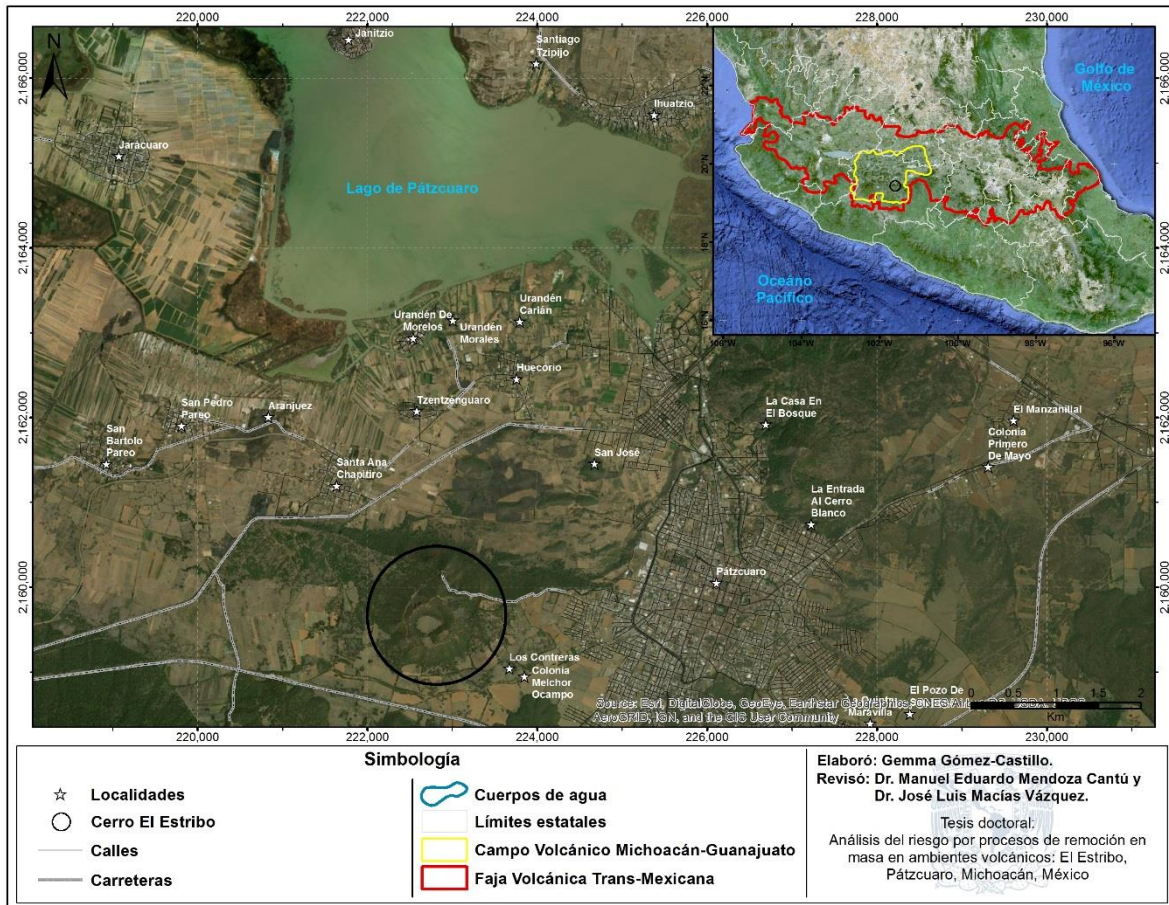


Figura 1.- Localización de la zona de estudio en imagen satelital. El volcán el Estribo se ubica dentro del CVMG (límites tomados de Mazzarini et al, 2010) y éste a su vez dentro de la FVTM (límites tomados de Ferrari et al, 2012).

En la región se han realizado numerosos trabajos enfocados principalmente a datar los volcanes y sus estructuras adyacentes (Hasenaka y Carmichael, 1985; Newton et al., 2005; Pola et al., 2014), cartografiarlos por diversos métodos (Johnson y Harrison, 1990), caracterizarlos geológicamente (Connor, 1987; Hasenaka, 1994) y determinar los peligros de las áreas circundantes (Isradé-Alcántara et al., 2005; Garduño-Monroy et al., 2009; Garduño-Monroy et al., 2011). Sin embargo, no se han realizado estudios enfocados al análisis de la vulnerabilidad y el riesgo derivado de los procesos de remoción en masa en este ambiente volcánico.

I.3 Justificación

Anteriormente se creía que El Estribo era un volcán monogenético conformado por productos piroclásticos resultado de actividad de tipo Estromboliana, que estaba compuesto de arena, cenizas, brechas y bombas y que se asentaba sobre una plataforma de rocas andesíticas-basálticas (Capra *et al.*, 2002; Isradé-Alcántara *et al.*, 2005; Garduño-Monroy *et al.*, 2009). Sin embargo, estudios recientes sugieren que El Estribo se compone de un volcán en escudo basal de edad ~126 ma (Pola *et al.*, 2014) coronado por un cono de ceniza y separados por un paleosuelo fechado en $28,360 \pm 170$ BP, descrito por Isradé-Alcántara *et al.* (2005). El volcán en escudo está cortado por una falla normal E-W que expone 200 m de flujos de lavas apilados de su interior. Al parecer, el cono de cenizas superior no está afectado por la falla. El escarpe de falla ha sido asociado a dos derrumbes, que pudieran estar o no ligados a actividad volcánica, fenómenos hidrometeorológicos extraordinarios, actividad sísmica, o tectónica y que han emplazado igual número de depósitos de avalanchas de escombros con topografía de montículos, expuestos al norte del Estribo y en la orilla sur del lago de Pátzcuaro (Pola *et al.*, 2014).

Existen diversos trabajos de geología estructural sobre las fallas regionales de la FVTM y en el CVMG las cuales podrían provocar la reactivación de antiguas cabeceras de deslizamientos como los ocurridos en El Estribo y en los alrededores del lago de Pátzcuaro (Isradé-Alcántara, 2009; Isradé-Alcántara *et al.*, 2005; Garduño-Monroy *et al.*, 2011; Pola *et al.*, 2014; 2015). Con esta perspectiva se pretende analizar la información existente sobre los colapsos ocurridos en el Volcán El Estribo, como su origen, causas, y alcances. Esta información es muy valiosa para poder simular eventos futuros (Macías, 2012) y construir un mapa de peligros asociados.

El área que abarca la zona de estudio del presente trabajo de investigación (zona sur de la cuenca del lago de Pátzcuaro) presenta un significativo crecimiento de la población y también un desarrollo económico y turístico importante en los últimos años (PDMP, 2012), con lo cual, la vulnerabilidad social, económica y ambiental aumenta drásticamente ante la ocurrencia de un fenómeno natural (Garduño Monroy y Macías, 2010).

Los estudios de riesgo por movimientos del terreno asociados a ambientes volcánicos en el Estado de Michoacán son nulos, ya que, aunque se cuenta con estudios

muy detallados y atlas del peligro geológico en las principales zonas volcánicas (Garduño-Monroy y Macías, 2010), no se ha evaluado la vulnerabilidad y, por tanto, no existe una integración con el análisis del peligro para conformar los estudios de riesgo tan necesarios en el Estado.

Por lo anterior, se debe analizar la información existente y generar la faltante para producir modelos espaciales mostrando la distribución de los peligros geológicos, en los cuales se muestre la probabilidad e intensidad con que podría ser afectada la zona por distintos fenómenos (Macías, 2012), evaluar la vulnerabilidad y reconocer el riesgo. Por otro lado, aún están en proceso de construcción o perfeccionamiento los enfoques y métodos para evaluar vulnerabilidad y riesgos de manera espacialmente explícita, además, la complejidad geológica en una zona restringida permite aplicar enfoques nuevos y perfeccionar estrategias existentes.

I.4 Supuestos de trabajo-hipótesis

El conocimiento detallado de los peligros geológicos geomorfológicos, permitirá modelar con mayor precisión la vulnerabilidad y riesgo de la población a sufrir tales eventos, lo cual reducirá costos en vidas, infraestructura y bienes materiales.

I.5 Objetivos

I.5.1 Objetivo general

Desde una perspectiva geográfico-espacial evaluar y modelar el riesgo por eventos geológicos asociados a ambientes volcánicos en El Estribo, Pátzcuaro, Michoacán, México.

I.5.2 Objetivos particulares:

- Sintetizar la información geológica y geomorfológica de la zona de estudio para generar un inventario completo de la información elaborada previamente por otros autores y la que será producida con este trabajo.

- Caracterizar en términos geológicos y geomorfológicos la zona de estudio para conocer la distribución espacial de los peligros geológicos y geomorfológicos asociados a este ambiente volcánico.
- Evaluar el peligro por eventos geológicos (principalmente por procesos de remoción en masa).
- Evaluar la vulnerabilidad por medio de la implementación del modelo SAVE. Estimar la distribución y niveles de la vulnerabilidad del área de estudio, a la vez que se analiza la percepción del riesgo de la población.
- Identificar la distribución y magnitud de los riesgos en un escenario de avalancha de escombros.

I.6. Localización y generalidades

De acuerdo a Gerhard (2000), Pátzcuaro fue fundado en 1324 y se menciona que los gobernantes chichimecas Parácume y Vápeane, hijos de Curátame, encontraron asiento para su pueblo “en el barrio de Pátzcuaro, llamado Tarimichundiro”. Posteriormente, el 20 de agosto de 1538, Don Vasco de Quiroga, haciéndose acompañar de los indígenas principales y de las autoridades españolas establecidas en Tzintzuntzan, toma el sitio de Pátzcuaro para erigir ahí una ciudad debido a las ventajas encontradas en ese lugar. Para 1553 le es entregado a Pátzcuaro el escudo de Armas y la Cédula real, otorgándole con ellos el título de Ciudad de la Provincia de Michoacán.

El municipio de Pátzcuaro tiene una superficie de 435.96 km², su clima es templado subhúmedo con lluvias en verano y la precipitación total anual promedio es de 918 mm.

La zona de estudio se localiza en el municipio de Pátzcuaro, Michoacán y abarca un área aproximada de 36 km² (figura 1). Para evaluar la vulnerabilidad se contemplaron siete localidades rurales y parte del área urbana de la ciudad de Pátzcuaro (figura 2), las cuales se describen a continuación:

ID	Localidad	Población total
1	San José (El Cerrito)	17
2	Santa Ana Chapiro	1042
3	Tzetzénguaró	440
4	Huecorio	832
5	Urandén Carián	72
6	Isla Urandén Morales (Urandén Chico)	19
7	Urandén de Morelos (Isla Urandén de Morelos)	295
8	Colonias de Pátzcuaro	1534

Tabla 1: Localidades en las que se ha centrado el estudio de la vulnerabilidad. ID: clave con la se identifican las poblaciones en el mapa de la figura 3. Población tomada de INEGI, 2015.

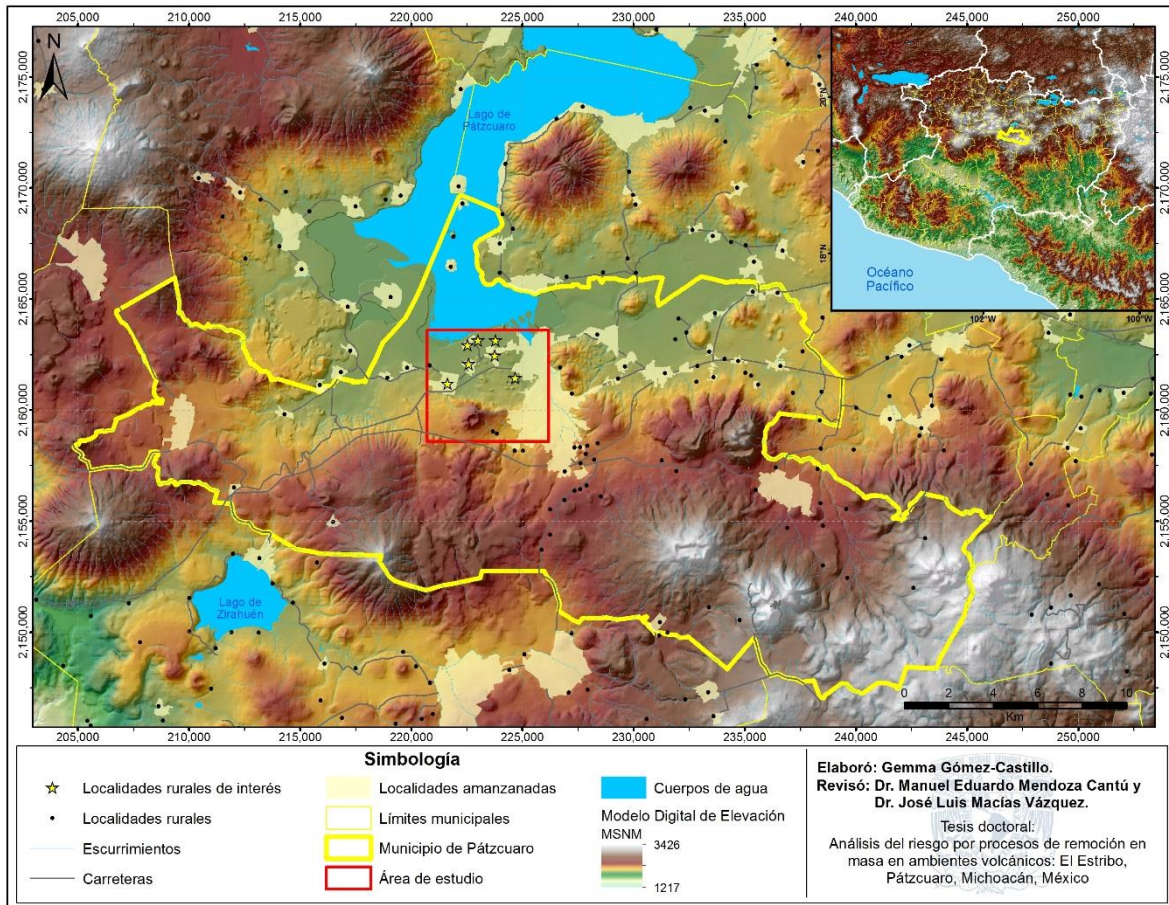


Figura 2. Localización de la zona de estudio dentro del municipio de Pátzcuaro y su colindancia con otros municipios de Michoacán.

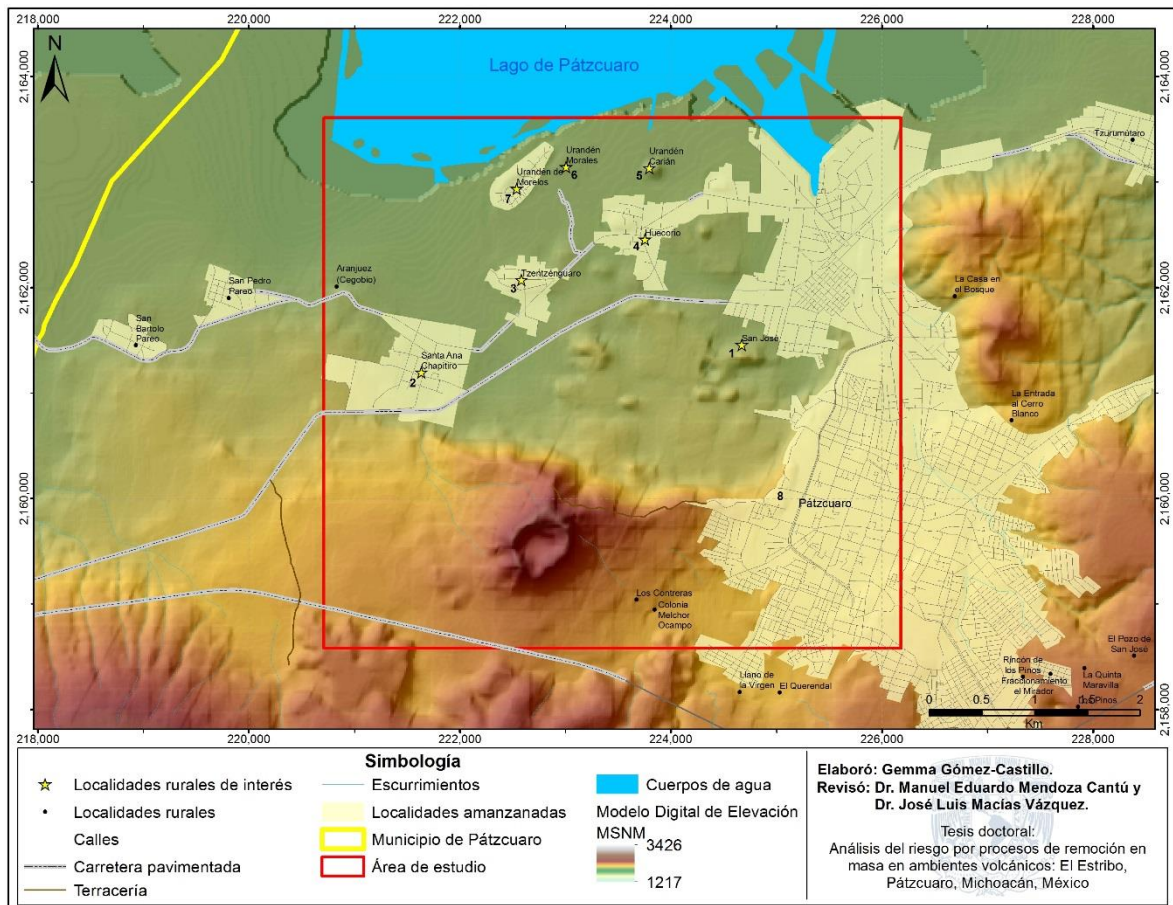


Figura 3. Ubicación de las localidades rurales en las que se centra este estudio.

1.6.1 Contexto geológico

1.6.1.1 Faja Volcánica Trans-Mexicana

También llamada Cinturón volcánico Trans-Mexicano, es una zona de vulcanismo activo que se localiza en la parte central de México, tiene una longitud aproximada de 1000 km y abarca desde el Golfo de California hasta el Golfo de México (Newton *et al.*, 2005; Garduño Monroy y Macías, 2010). Esta faja se encuentra sobre la parte sur de la placa de Norteamérica, la cual es subducida en la parte occidental por las placas de Cocos y Rivera; esta zona de vulcanismo activo presenta varias peculiaridades, entre las más importantes se encuentran: 1) La parte central y oriental no son paralelas a la Trinchera Mesoamericana; 2) Los principales estratovolcanes están alineados transversalmente (es decir, en cadenas aproximadamente Norte-Sur) con respecto a la orientación del arco; 3) Presenta una gran variabilidad geoquímica; 4) Las placas subducidas son relativamente

jóvenes (10Ma de Rivera y entre 11 y 23 Ma de Cocos); 5) Hay ausencia de sismos por debajo de la FVTM (Ferrari et al., 2012). El grosor de la corteza por debajo de la FVTM, varía considerablemente de 20 a 30 km en los extremos este y oeste, hasta los 50 km en la parte central (aproximadamente bajo la Ciudad de México) (Urrutia-Fucugauchi, 1986).

La geometría de las placas que subducen también varía considerablemente, ya que la placa de Rivera y la parte más occidental de la placa de Cocos tienen una inclinación de aproximadamente 70°. Hacia el oriente, la inclinación inicial de la placa de Cocos es de 15° hasta una distancia de 80 km desde la costa, y al norte se vuelve horizontal a los 50 km de profundidad, extendiéndose unos 200 km. Existe una rasgadura entre las placas de Rivera y Cocos, al NNO del volcán Colima, a partir de los 150 km de profundidad, la cual es el resultado de una ligera divergencia entre ellas. La placa de Rivera se termina a aproximadamente 350 km de profundidad (Pardo y Suárez, 1995).

La composición de las rocas de la FVTM varía ampliamente en el tiempo y el espacio, pero se identifican 4 episodios principales, los cuales son: 1) Mioceno medio y tardío, desarrollo de un arco de composición media. 2) Mioceno tardío, representado por un episodio máfico. 3) Finales del Mioceno y Plioceno temprano, caracterizado por un episodio silíceo cambiando a bimodal. 4) Plioceno tardío, se reinstaura un arco con gran variabilidad composicional (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

Durante el Mioceno Medio al Plioceno Temprano (13 a 4.5 Ma), ocurrieron los desplazamientos de las placas Pacífico hacia el noroeste, Norteamérica hacia el occidente, Cocos hacia el noreste y Caribe hacia el oriente, entonces la porción media de México se convirtió en una zona de debilidad cortical por el levantamiento y fracturamiento, facilitándose así la formación de la FVTM.

1.6.1.2 Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato

Dentro de la FVTM ocurren zonas con una alta concentración de volcanes que coexisten en tiempo y espacio y son conocidos como campos volcánicos. En la parte centro occidental de la FVTM se encuentra el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) que contiene 900 conos cineríticos, 100 pequeñas estructuras (conos, domos, gruesos flujos de lava, etc.), más de 300 volcanes de tamaño medio y domos de lava, pero no existen grandes volcanes activos (Hasenaka, 1994; Hasenaka et al., 1994).

El CVMG fue mencionado por primera vez en 1985, por Hasenaka y Carmichael. Ellos estudiaron ampliamente la zona y determinaron que casi 75% de los volcanes están distribuidos entre los 200 y 300 km de distancia de la trinchera mesoamericana. También identificaron volcanes en escudo que ya habían sido erosionados y sobre estos nacían conos de cenizas; estos conos comúnmente presentan erupciones de olivino basáltico y andesitas basálticas, aunque presentan menores cantidades de silicio que en otras zonas de la FVTM. Estos autores también realizaron una clasificación morfológica basada en la densidad de disección y características de la superficie de los flujos de lava, con ello llegaron a la conclusión de que 78 volcanes tienen menos de 40,000 años, todos ellos están situados en el sur y algunos presentan alineación NE (paralelo al movimiento relativo de la placa de Cocos). A pesar del gran número de conos de ceniza y otros pequeños volcanes en el CVMG, el volumen total de material expulsado sugiere una tasa baja de aporte de magma, ya que este volumen total estimado durante los últimos 40,000 años en un área de 15,000km² es de apenas 31 km³, con lo cual tenemos una tasa de erupción de magma de 0.8 km³/1000 años, lo cual es bajo en comparación de un volcán compuesto en otra zona de la FVTM (Hasenaka y Carmichael, 1985).

1.6.2 Contexto geomorfológico

La región del lago de Pátzcuaro es un graben originado por tensión y distensión de las fallas con orientación NE-EO de la FVTM, por tanto la conformación geomorfológica es el resultado de una intensa actividad tectónica y volcánica que tuvo lugar durante el Terciario tardío y principios del Cuaternario (Chacón-Torres *et al.*, 1991). La cuenca del lago de Pátzcuaro es una depresión tectónica de 929 km² y alrededor de ella existe un relieve muy complejo por el vulcanismo tan intenso. Esta cuenca cuenta con más ## volcanes dispuestos a su alrededor e incluye del mismo lago (Osorio-Ocampo *et al.*, 2018). La cuenca del lago de Pátzcuaro colinda al norte con las sierras de la Comanja, del Zirate y del Tigre; al sur con la Sierra de Santa Clara y Tingambato; al oeste con las sierras de Nahuatzen, Pichátaro y Pátzcuaro y; al este con el cerro del Sanambo y lomeríos de menor altitud.

De acuerdo a INEGI (1993), la zona se puede dividir en al menos 7 paisajes geomorfológicos muy bien demarcados: Gran sierra volcánica compleja con llanos; pequeños llanos aislados; malpaíses; vaso lacustre; pequeños llanos aislados con lomeríos; lomeríos de colinas redondeadas y; mesetas lávicas.

I.6.3 Contexto geográfico

El municipio de Pátzcuaro abarca un área de 435.96 km² y representa el 0.74 por ciento del Estado de Michoacán. Sin embargo, el área de estudio de este trabajo se enfoca en la parte sur del lago de Pátzcuaro y las coordenadas extremas de esta zona son 19°33'30.27" N, 101°40'20.79" O, para el punto NO; 19°29'55.9" N, 101°36'17.62" O para el punto SE, cubriendo un área de 35.36 km². El clima predominante en la zona es templado subhúmedo con lluvias de verano, extremoso y con la temperatura más cálida antes del mes de Junio (Gómez-Tagle, 1994). Respecto a su hidrología, el lago de Pátzcuaro es una cuenca endorréica que colinda al este con el río Grande de Morelia, al oeste con el río Lerma y al sur con la cuenca del lago de Zirahuén (Chacón-Torres *et al.*, 1991). En lo que concierne a la vegetación, para la zona de estudio se tiene presencia de bosque de pino-encino, bosque de encino, agricultura de temporal con cultivo anual, agricultura de riego, vegetación acuática de tular y zona urbana (Caballero *et al.*, 1994).

I.7 Estructura de la investigación

Esta tesis se desarrolló en 6 capítulos. El capítulo I hace una contextualización general de la zona de estudio, una breve descripción de la geología del lugar, los antecedentes, planteamiento del problema, justificación, hipótesis y los objetivos que se tienen contemplados.

El capítulo II es el marco teórico-conceptual en el cual se abordan los temas de los procesos de remoción en masa y el riesgo volcánico; la segunda parte de este capítulo es un artículo publicado en el año 2017 y en él se hizo una revisión detallada de la literatura reciente sobre el riesgo volcánico y sus principales conceptos. El capítulo III aborda la temática de la geomorfología detallada de la zona y los productos cartográficos que se elaboraron a partir de ese tópico. En el capítulo IV se analiza el trabajo geológico

de campo y las simulaciones de avalanchas para conformar el peligro asociado a los procesos de remoción en masa que se presenta en el área de estudio; El capítulo V se expone como se hizo la investigación respecto al análisis de la vulnerabilidad y cómo, en conjunto con el peligro, se determinó el riesgo para cada uno de los diferentes peligros que se determinaron en el capítulo anterior. Finalmente, el capítulo VI incluye las conclusiones generales a las que se ha llegado y se discute acerca de las ventajas y desventajas de las aproximaciones y formas de acercarse al conocimiento que se hicieron esta investigación.

I.8 Bibliografía

- Caballero, J., Barrera-Bassols, N. y Mapes, C. 1994. Vegetación terrestre de la cuenca del lago de Pátzcuaro. *In: TOLEDO, V. M., ÁLVAREZ-ICAZA, P. & ÁVILA, P. (eds.) Plan Patzcuaro 2000: Investigación Multidisciplinaria para el Desarrollo Sostenido.* México, D.F.: Fundación Friedrich Ebert.
- Capra, L., Macías, J. L., Scott, K. M., Abrams, M. y Garduño Monroy, V. H. 2002. Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico - behavior, and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 81-110.
- Connor, C. B. 1987. Structure of the Michoacan-Guanajuato Volcanic Field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33, 191-200.
- Chacón-Torres, A., Pérez-Mungía, R. y Muzquiz-Irbe, L. E. 1991. Síntesis limnológica del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Biología Acuática 1. Secretaría de Difusión Cultural. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo*, 53.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V. y Manea, M. 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523, 122-149.
- Foshag, W. F. y González-Reyna, J. 1956. Birth and development of Paricutin volcano. *U.S. Geological Survey Bulletin*, 965, 355-489.
- Garduño-Monroy, V. H., Chávez-Hernández, J., Aguirre-González, J., Vázquez-Rosas, R., Mijares Arellano, H., Israde-Alcántara, I., Hernández-Madrigal, V. M., Rodríguez-Pascua, M. A. y Pérez López, R. 2009. Zonificación de los periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Mich., México, con base en microtemores y estudios de paleosismología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, 623-637.
- Garduño-Monroy, V. H. y Macías, J. L. 2010. Peligros volcánicos del Estado de Michoacán. *In: MICHOACÁN, C. E. D. C. Y. T. D. (ed.). Cuadernos de divulgación Científica y Tecnológica del Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán. Innovación es solución a mi alcance*
- Garduño-Monroy, V. H., Soria-Caballero, D. C., Israde-Alcántara, I., Hernández-Madrigal, V. M., Rodríguez-Ramírez, A., Ostroumov, M., Rodríguez-Pascua, M. A., Chacon-Torres, A. y Mora-Chaparro, J. C. 2011. Evidence of tsunami events in the paleolimnological record of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México. *Geofísica Internacional*, 50, 147-161.
- Garduño Monroy, V. H. y Macías, J. L. 2010. Peligros volcánicos del Estado de Michoacán. *In: MICHOACÁN, C. D. D. C. Y. T. D. C. E. D. C. Y. T. D. (ed.) Innovación es solución a mi alcance.*

- Gerhard, P. 2000. *Geografía histórica de la Nueva España 1519-1821*, México, D. F., Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gobierno, S. D. 2016. Reglamento de Protección civil del H. Ayuntamiento Constitucional de Pátzcuaro, Michoacán. Décima cuarta sesión ordinaria. Acta número 21. In: OCAMPO, P. O. D. G. C. D. E. D. M. D. (ed.). Morelia, Michoacán.
- Gómez-Tagle, A. R. 1994. Tres niveles de erosión en la cuenca de Pátzcuaro, Michoacán, como base para acciones y obras de conservación. *Folleto Técnico*. SARH-INIFAP.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M. T. y Ferrari, L. 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo del Centenario. Temas Selectos de la Geología Mexicana. Tomo LVII, 227-283.
- Hasenaka, T. 1994. Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, 13-31.
- Hasenaka, T., Ban, M. y Delgado Granados, H. 1994. Contrasting volcanism in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, central Mexico: Shield volcanoes vs. cinder cones. *Geofísica Internacional*, 33, 125-138.
- Hasenaka, T. y Carmichael, I. S. E. 1985. The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, Central Mexico: Their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 105-124.
- Instituto Nacional De Estadística, G. E. I. I. 1993. Síntesis geográfica del Estado de Michoacán.
- Isradé-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., Fisher, C. T., Pollard, H. P. y Rodríguez-Pascua, M. A. 2005. Lake level change, climate, and the impact of natural events: the role of seismic and volcanic events in the formation of the Lake Patzcuaro Basin, Michoacan, Mexico. *Quaternary International* 135, 35–46.
- Johnson, C. A. y Harrison, C. G. A. 1990. Neotectonics in central Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64, 187-210.
- Luhr, J. F. y Carmichael, I. S. E. 1982. The Colima Volcanic Complex, Mexico: III Ash- and Scoria-Fall Deposits from the Upper Slopes of Volc~n Colima *Contributions to Mineralogy and Petrology* 80, 262-275.
- Luhr, J. F. y Prestegard, K. L. 1988. Caldera formation at Volcán Colima, Mexico, by a large large holocene volcanic debris avalanche. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 35, 335-348.
- Luhr, J. F., Simkin, T. y Cuasay, M. 1993. *Parícutin: the volcano born in a Mexican cornfield.*, US Geoscience Press.
- Macías, J. L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen conmemorativo del centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana, tomo LVII, 379-424.
- Macías, J. L. 2012. Vulcanismo activo en México: carencias y perspectivas. In: CIENCIAS, A. M. D. (ed.) *Congreso de Ciencias y Humanismo, del 18 al 20 de enero de 2012*. México, D.F.
- Newton, J. A., Metcalfe, S. E., Davies, S. J., Cook, G., Barker, P. y Telford, R. J. 2005. Late Quaternary volcanic record from lakes of Michoacán, central Mexico. *Quaternary Science Reviews* 24.
- Pardo, M. y Suárez, G. 1995. Shape of the subducted Rivera and Cocos plates in southern Mexico: Seismic and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research*, 100, 12357-12737.
- Pola, A., Crosta, G., Fusi, N., Barberini, V. y Norini, G. 2012. Influence of alteration on physical properties of volcanic rocks. *Tectonophysics*, 566–567, 67-86.
- Pola, A., Macías, J. L., Garduño-Monroy, V. H., Osorio-Ocampo, S. y Cardona-Melchor, S. 2014. Successive collapses of the El Estribo volcanic complex in the Pátzcuaro Lake, Michoacán, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289, 41–50.

- Robin, C. y Boudal, C. 1987. A gigantic Bezymianny-type event at the beginning of modern volcan Popocatepetl
Author links open overlay panel. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37, 115-130.
- Sánchez Caballero, I. L. 2010. *Preservación de la información histórica local de Nuevo Parangaricutiro. Cuento ilustrado "Una aventura en el viejo San Juan Parangaricutiro"*. Licenciatura, Universidad Don Vasco, incorporada a la UNAM.
- Siebert, L. 1984. Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 22, 163-197.
- Siebert, L. 1996. Hazards of Large Volcanic Debris Avalanches and Associated Eruptive Phenomena. In: SCARPA, R. & TILLING, R. (eds.) *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Uj, T. 1983. Volcanic dry avalanche deposits — Identification and comparison with nonvolcanic debris stream deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18, 135-150.
- Urquijo-Torres, P. S. 2007. *Humboldt y el Jorullo: Historia de una exploración*, Instituto de Geografía, Unidad Académica de Morelia.
- Urrutia-Fucugauchi, J. 1986. Crustal thickness, heat flow, arc magmatism, and tectonics of Mexico-preliminary report. *Geofísica Internacional*, 25, 559–573.
- Van Wyk De Vries, B. y Delcamp, A. 2015. Volcanic Debris Avalanches. In: DAVIES , T. & SHRODER JR, J. F. (eds.) *Landslide Hazards, Risks, and Disasters*. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury.
- Vincent, P. M., Camus, G., Cantagrel, J. M., Mossand, P., Robin, C. y Gourgaud, A. 1983. Gigantic debris flow deposits from Colima Volcano (Mexico). *2nd E.U.G. meet.* Strasbourg.



CAPÍTULO II: MARCO CONCEPTUAL. PELIGRO, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR VULCANISMO Y SUS FENÓMENOS ASOCIADOS

**Tesis:
Análisis del riesgo por procesos de remoción en masa
en ambientes volcánicos: El Estribo, Pátzcuaro,
Michoacán, México**



Capítulo II. Marco conceptual. Peligro, vulnerabilidad y riesgo por vulcanismo y sus fenómenos asociados

El presente capítulo tiene como objetivo presentar un marco teórico-conceptual respecto a los procesos de remoción en masa y el riesgo volcánico; esto se realizó mediante una exhaustiva revisión bibliográfica, principalmente de la bibliografía más nueva y actualizada. La segunda parte de este capítulo es un artículo publicado en el año 2017 en el que se hizo una revisión detallada de la literatura reciente sobre el riesgo volcánico y sus principales conceptos.

II.1 Definición de fenómeno natural

Es cualquier expresión y manifestación de la naturaleza (Romero y Maskrey, 1993). Un fenómeno natural es toda forma de expresión que adopta la naturaleza como resultado de su funcionamiento y procesos internos, pero debemos considerar que un fenómeno natural, en el sentido estricto de la palabra, no debe afectar a los seres humanos porque sus efectos negativos no entran en contacto con ellos, es decir, los fenómenos naturales no deben ser considerados como peligros naturales directamente (OEA, 1993; Romero y Maskrey, 1993). En general, convivimos de manera cotidiana con los fenómenos naturales, ya que ellos forman parte de nuestro medio ambiente natural, los ejemplos más comunes serían los sismos de baja magnitud, las lluvias de temporada, los vientos, la erosión, etc., sin que estos causen daño al hombre (Romero y Maskrey, 1993).

II.2 ¿Cuándo un fenómeno natural se convierte en peligro natural?

Un fenómeno natural se convierte en peligro cuando ocurre en un área poblada o con infraestructura que puede ser dañada, es decir, en áreas donde no existen intereses humanos a vulnerar, los fenómenos naturales no constituyen un peligro ni causan desastres (OEA, 1993).

En otras palabras, un peligro natural implica la ocurrencia de una condición o fenómeno natural, que amenaza o actúa peligrosamente en un espacio y tiempo determinados, tendiendo generalmente a ser los fenómenos naturales extremos o de muy larga duración los que pueden representar un mayor peligro para la vida humana y sus

bienes e infraestructura, además de que algunos peligros naturales pueden tener repercusiones a largo plazo debido a las consecuencias asociadas (Alcántara-Ayala, 2002).

II.3 ¿Qué es un desastre natural?

En términos generales, un desastre natural ocurre cuando “un peligro natural causa un número inaceptable de muertes o daños a propiedades” (OEA, 1993). En otras palabras, podemos afirmar que un desastre se presenta cuando un fenómeno natural peligroso se correlaciona con la vulnerabilidad socioeconómica y física de los sistemas sociales y afecta con un impacto mayor a la estructura social (Romero y Maskrey, 1993; Alcántara-Ayala, 2002; López-Ibor, 2005; Perry, 2007). Muchos autores consideran un mínimo número de decesos humanos, personas heridas, pérdidas económicas y materiales, y el daño que se produce al ambiente para considerar un evento como desastroso, en este sentido, Wright (1997) propone como características primordiales para considerar un desastre que debe haber un mínimo de 120 personas afectadas (excepto en casos de guerra) y la intervención y coordinación no rutinaria entre diferentes organizaciones y niveles de gobierno para hacer frente al acontecimiento.

II.4 Riesgo volcánico: Estado del arte y desafíos de trabajo

(Artículo publicado en: Revista Geográfica 158. Enero-diciembre 2017: 69 -106)

Gemma Gómez-Castillo, Manuel E. Mendoza, José Luis Macías, y Erna López Granados.

II.4.1 Abstract

This article has two objectives: (1) provide a conceptual framework of volcanic risk, and (2) review research conducted since 1995 to define the prospects and challenges that exist in this science. A search by title, abstract, and keywords for the phrases "volcanic risk", "volcanic hazard" and "volcanic vulnerability" returned 161 articles in 39 journals, which are reviewed here.

This review found that continued work is needed to build a general theoretical framework of volcanic risk that can be widely accepted and applied, and that avoids confusion and misuse of various terms. Also vital is continued work on aspects of risk perception,

management, and policy, all of which are key elements of disaster prevention and mitigation.

Palabras clave: Conceptual framework, volcanic hazard, vulnerability, risk, quantitative review.

Resumen

El presente artículo tiene dos objetivos: primero, aportar un marco conceptual del riesgo volcánico y segundo, definir las perspectivas y retos de trabajo en base a la revisión de artículos publicados entre 1995 y 2014. Se revisaron 161 artículos publicados en 39 revistas a partir de las palabras de búsqueda: "volcanic risk", "volcanic hazard" y "volcanic vulnerability", la búsqueda se delimitó al título, resumen y palabras clave.

Se recomienda construir un marco teórico-conceptual generalizado, que sea ampliamente aceptado y usado, para evitar confusiones y mal uso de términos. También es importante continuar trabajando en la percepción, manejo, gestión y política del riesgo, elementos claves para la prevención y mitigación.

Palabras clave: Marco conceptual, peligro volcánico, vulnerabilidad, riesgo, revisión cuantitativa.

Resumo

O presente artigo tem dois objetivos: primeiro, fornecer um quadro conceitual do risco vulcânico e segundo, definir as perspectivas e desafios do trabalho com base na revisão de artigos publicados entre 1995 e 2014. 161 artigos publicados em 39 revistas foram analisados, procurando palavras como: "risco vulcânico", "perigo vulcânico" e "vulnerabilidade vulcânica", a pesquisa foi delimitada por título, resumo e palavras-chave.

Recomendase construir um quadro teórico conceitual generalizado, que poderá ser amplamente aceito e utilizado, para evitar confusões e maus usos dos termos. Também é importante continuar trabalhando na gestão da percepção, gestão da política dos riscos, sendo elementos chave da prevenção e mitigação.

Palabras clave: quadro conceptual, perigo vulcânica, vulnerabilidade, risco, revisão quantitativa.

II.4.2. Introducción

El vulcanismo ha jugado un papel determinante durante la historia geológica de la Tierra, ya que la corteza oceánica y la continental tienen orígenes volcánicos. En la escala geológica del tiempo, la actividad volcánica ha beneficiado a la humanidad creando terrenos fértiles, permitiendo el surgimiento y desarrollo de civilizaciones. Sin embargo, si se considera la escala humana del tiempo, la actividad volcánica explosiva impacta negativamente, especialmente las áreas pobladas o agrícolas (Tilling, 1993; Sigurdsson et al., 2000; Lookwood y Hazlett, 2010; Witze, 2015).

El origen y ascenso del magma a través del manto y corteza y su erupción en superficie son el objeto de estudio de la vulcanología (Sigurdsson et al., 2000), ciencia que comenzó su desarrollo a principios del siglo XIX, una vez que se habían establecido las bases de la Geología durante el siglo anterior (Lookwood y Hazlett, 2010). En América Latina (AL) hubo algunos intentos por aproximarse al estudio de los volcanes en el siglo XVIII con el nacimiento del volcán Jorullo en Michoacán, México (Ruiz-Guadalajara, 2004; Hurtado Torres, 2009; Urquijo-Torres, 2010; Guilbaud et al., 2011). Sin embargo, los estudios formales comenzaron hasta el año de 1902 con la catástrofe de la Montaña Pelée, en la isla caribeña de Martinica (Fisher y Heiken, 1982; Westercamp y Traineau, 1983; Bourdier et al., 1989; Tanguy, 1994); luego en 1943, los vulcanólogos del mundo centraron su interés nuevamente en México con el nacimiento del volcán Parícutín (Bullard, 1947; Foshag y González-Reyna, 1956; Hasenaka y Carmichael, 1985; Inbar et al., 1994; Garduño-Monroy et al., 2009).

En la década de los 80's hubo dos eventos trágicos que provocaron serios desastres y marcaron la historia de AL en cuanto a vulcanismo se refiere. El primero en 1982 con la erupción del volcán Chichón al sur de México (Macías et al., 2003; Tilling, 2009; Limón-Hernández y Macías, 2009); el segundo desastre volcánico, ocurrió tres años después con la erupción del Nevado del Ruiz en Colombia (Herd, 1986; Barberi et al., 1990; Pierson et al., 1990; Thouret, 1990; Voight, 1990). Estos eventos aislados hicieron que cada vez un mayor número de científicos se interesaran en el estudio de los volcanes y sus afectaciones directas a la población y a la economía (Sigurdsson y Carey, 1986; Macías y Aguirre, 2006).

Si comparamos la ocurrencia de los desastres volcánicos con otros tipos de desastres de origen natural o antropogénico, los desastres volcánicos suceden con lapsos de recurrencia mayores y provocan menos pérdidas de vidas humanas y daños materiales que el resto de los desastres. Por ejemplo, el desastre natural que más vidas ha cobrado en la historia de la humanidad fue el sismo de Huahsien (China) en 1556, que arrebató la vida de más de 820,000 personas; en contraste, la erupción volcánica con mayor número de muertos fue la del volcán Tambora (Indonesia) en 1815, con 92,000 decesos (Stillwell, 1992; Tilling, 1993). Los desastres naturales han sido importantes en la historia y el desarrollo de AL y las afectaciones por eventos volcánicos han sido cuantiosas; sin embargo, ocupan el sexto lugar en ocurrencia (el primer lugar lo tienen las inundaciones) (Charvériat, 2000).

El presente artículo está dividido en dos partes principales, la primera es un marco conceptual de los peligros volcánicos y otros términos fundamentales empleados en el análisis del riesgo volcánico. La segunda parte consiste en una revisión cuantitativa de la bibliografía más reciente que se ha publicado respecto al tema del riesgo volcánico (1995 al 2014).

II.4.3 Conceptos principales del riesgo volcánico

II.4.3.1 Peligro volcánico

La amenaza o peligro volcánico se refiere a la probabilidad de que ocurra un tipo específico de evento volcánico que pueda afectar cierta área, con una intensidad particular, en un tiempo determinado y cause la muerte, lesiones, daños a la propiedad, la infraestructura, pérdida de medios de sustento, disrupción del funcionamiento social y económico, o daños ambientales (Sigurdsson et al., 2000; Taubenböck et al., 2008; UNISDR, 2009; Lookwood y Hazlett, 2010; Bignami et al., 2012; Keller et al., 2012).

La mayor actividad volcánica se presenta en los límites de las placas tectónicas (Cottrell, 2014) y los diferentes peligros volcánicos se asocian con tipo de magma y el ambiente tectónico en el que éste se desarrolla (López-Ruiz y Cebriá, 2007). Por ejemplo, la actividad volcánica efusiva se relaciona con magma básico, muy fluido, pobre en sílice y bajo contenido de volátiles (baja explosividad), este magma es característico de límites de placa divergentes y puntos calientes (hot spots); por el contrario, el vulcanismo

explosivo se localiza, principalmente, en márgenes convergentes, dónde el magma es ácido, tiene un alto contenido en sílice y volátiles (Kusky, 2008).

El primero en proponer una clasificación de la explosividad de las erupciones fue Walker (1973), teniendo como criterios la dispersión y la fragmentación del material, partiendo de la caracterización de los depósitos piroclásticos. Posteriormente, para medir la magnitud de explosividad de una erupción volcánica, Newhall y Self (1982) diseñaron un índice que es usado actualmente y se conoce como VEI (Volcanic Explosivity Index), el cual fue determinado teniendo como principales criterios la cantidad de material expulsado, la altura de la columna eruptiva y la duración de la erupción. El VEI asigna valores de 0 (erupciones efusivas muy tranquilas) al 8 (erupciones explosivas colosales). También se manejan otras clasificaciones; por ejemplo, de acuerdo a la viscosidad del magma, (hawaiano, estromboliano, vulcaniano, pliniano y ultrapliniano) (Sigurdsson et al., 2000). Mientras más explosiva sea una erupción, mayor peligro representa; sin embargo, las erupciones más explosivas se presentan en intervalos de tiempo mucho más largos (Newhall y Self, 1982; Tilling, 2008; Lookwood y Hazlett, 2010; Cottrell, 2014); por ejemplo, una erupción de VEI 01 puede ocurrir diariamente, una de VEI 8 ocurre cada más de 10,000 años (Newhall y Self, 1982; Sigurdsson et al., 2000; Rothery, 2010; Bignami et al., 2012; Plag et al., 2015). Los peligros volcánicos se clasifican en primarios (directos) (Smith, 2013) y secundarios (asociados) (Keller et al., 2012) (Tabla 1).

Tabla II-1
Los peligros volcánicos

Tipo de peligro	Nombre del peligro	Características
Peligros volcánicos primarios	Materiales de caída aérea	En este término se engloban la caída de cenizas, piroclastos y productos balísticos. Las principales afectaciones que producen las cenizas son los problemas con el tráfico aéreo, accidentes de tránsito por caminos resbalosos y poca visibilidad, daños a la agricultura, daños a instalaciones industriales, interferencias en radio y televisión, colapso de estructuras y, cuando se humedecen, se transforman en un cemento que se introduce por conductos, llegando a bloquearlos (Ortiz, 2000).

	Flujos de lava	Materiales o productos volcánicos más o menos líquidos que son susceptibles de fluir y derramarse. Los flujos de lava poco viscosa destruyen todo a su paso, pero la mayoría de éstas se mueven lo suficientemente lentas como para que las personas se pongan fuera de su alcance; sin embargo, estos avanzarán y derribarán o enterrarán todo lo que se encuentre a su paso, provocarán incendios por la elevada temperatura de la lava y será más peligrosa si la erupción se produce en una zona en la que exista un glaciar, pues puede llegar a tener como resultado la formación de un lahar.
	Flujos piroclásticos (corrientes piroclásticas de densidad)	Son mezclas calientes de alta densidad de fragmentos de roca, gases y ceniza, que con temperaturas por lo general arriba de 100 °C, descienden por los flancos del volcán a velocidades de hasta más de 100 km/h. Los flujos piroclásticos destruyen por impacto directo, entierran sitios con restos de rocas caliente, derriten nieve y forman lahares, queman los bosques, cultivos y edificios (Sigurdsson <i>et al.</i> , 2000).
	Gases	Son las sustancias volátiles emanadas por un volcán y constituyen la mayor parte del volumen de las erupciones volcánicas. El CO ₂ es un gas incoloro e inodoro que, generalmente, no representa un peligro directo para la vida porque se diluye muy rápidamente; sin embargo, en determinadas circunstancias el CO ₂ concentra altos niveles en la atmósfera y puede llegar a ser letal para las personas y animales, ya que puede fluir hacia zonas bajas; cuando una persona respira aire con más de 30% de CO ₂ , puede provocarle la inconsciencia o hasta la muerte (Bignami <i>et al.</i> , 2012).
	Sismos	Son las vibraciones del terreno, relacionados con el movimiento del magma o los procesos volcánicos, que pueden ocurrir en o cerca de los volcanes y se caracterizan por ser movimientos someros (de 1 a 9 km de profundidad). Los sismos disparados por actividad volcánica pueden causar daños a las construcciones e infraestructura, desencadenar deslizamientos, provocar cortes en la electricidad, generar incendios, licuefacción, etc. (Bignami <i>et al.</i> , 2012).
	Ondas de choque y sonido atmosférico	Las ondas de choque corresponden a la presión producida en la explosión volcánica que viaja a una velocidad mayor que la del sonido, su ocurrencia indica que el material expulsado estaba a mayor presión que la atmósfera. El sonido atmosférico se produce durante las fases explosivas, por la rápida expansión y turbulencias de los gases y son uno de los sonidos más fuertes

		conocidos por el hombre (Smith, 1976). Las grandes ondas de choque pueden dañar o derribar edificios y son tan poderosas que pueden llegar a darle la vuelta al mundo.
	Deformación del terreno	Se le llama así a los desplazamientos inducidos por el movimiento del magma hacia la superficie que provoca cambios en la topografía. La deformación pueden ser horizontal (apertura de grietas) y/o vertical (inflamiento del terreno). Las deformaciones también provocan importantes daños en edificios, estructuras y vías de comunicación. Las modificaciones que sufre el relieve propician que los procesos de erosión y sedimentación afecten negativamente a la zona (Ortiz, 1996).
Peligros volcánicos secundarios	Lahares	Es un término indonesio que se refiere a los flujos generados en los flancos de un volcán, los cuales están constituidos por una mezcla de agua, detritos y fragmentos de suelo (Smith y Fritz, 1989). Son flujos densos producidos por el escurrimiento de agua de ríos y lluvias y materiales volcánicos, especialmente piroclastos. Los principales peligros de los lahares son: deslizamientos súbitos en los volcanes, destrucción por impacto directo, obstrucción de arroyos y enterrar valles (Ortiz, 1996; Lavigne <i>et al.</i> , 2000; Sigurdsson <i>et al.</i> , 2000).
	Tsunamis	Es un término japonés que se traduce como "onda larga en el puerto", y fue originalmente usado para designar las grandes olas marítimas desencadenadas por terremotos; sin embargo, el término se ha extrapolado para incluir a las ondas que se presentan en los océanos o en lagos que tienen un disparador volcánico (Sigurdsson <i>et al.</i> , 2000).
	Deslizamientos, avalanchas y derrumbes	Son grandes masas de roca y suelo que caen, se deslizan o fluyen rápidamente por la fuerza de la gravedad, pueden alcanzar velocidades hasta de 100 km/h y avanzar grandes distancias (Lookwood y Hazlett, 2010; Papale, 2014). Un deslizamiento puede sepultar valles y dejar como evidencia de su paso una topografía de montículos caóticos y depresiones cerradas. Si el depósito es lo suficientemente grueso, puede generar represas en las corrientes de agua, hasta formar lagos en los días posteriores; esta agua podría, eventualmente, drenar catastróficamente y generar lahares e inundaciones aguas abajo.
	Inundaciones	Las inundaciones volcanogénicas son el represamiento de alguna corriente de agua que fue anormalmente

		<p>contenida o retenida por un evento volcánico o por el colapso de una caldera volcánica que contenía un lago.</p>
	<p>Hambruna post-eruptiva</p>	<p>Es la interrupción en el suministro de alimentos por la pérdida inmediata de los cultivos y el ganado, que a largo plazo, se traduce en la nula productividad de las tierras agrícolas. Los gases son inyectados en la atmósfera y producen cambios en el clima de grandes regiones, provocando sequías y pérdida de cosechas (Sigurdsson <i>et al.</i>, 2000; Tilling, 2008). Este peligro secundario es el que más vidas ha cobrado en los registros históricos del vulcanismo los gases son inyectados en la atmósfera y producen cambios en el clima de grandes regiones, provocando sequías y pérdida de cosechas (Sigurdsson <i>et al.</i>, 2000; Tilling, 2008). Este peligro secundario es el que más vidas ha cobrado en los registros históricos del vulcanismo (Tanguy <i>et al.</i>, 1998; Tilling, 2008).</p>
	<p>Cambios en la temperatura y calidad del agua</p>	<p>Es la alteración y contaminación del recurso hídrico con partículas sólidas, líquidas y gaseosas que afectan sus características organolépticas (sabor, olor y color), además de que generalmente se vuelve nociva para los seres vivos. Los cambios en la temperatura (aumento, generalmente) en las aguas superficiales se presenta por la caída de material piroclástico, o porque la vegetación y los árboles fueron quemados o arrancados y no proporcionan sombra que ayude a disminuir la temperatura del agua. Las afectaciones que producen los cambios en la temperatura del agua son la eutrofización (exceso de nutrientes que favorece el crecimiento de algas que enturbian el agua), menos oxígeno en el agua caliente que en la fría, proliferación de organismos patógenos como bacterias y parásitos, mortandad de la vegetación y de la fauna acuática muy susceptibles a los cambios de temperatura, así como una mayor alteración y desprendimiento de las partículas del subsuelo (Organización Panamericana de la Salud, 2005).</p>
	<p>Lluvia ácida y tormentas eléctricas</p>	<p>La lluvia ácida es la condensación de las gotas de lluvia alrededor de los aerosoles volcánicos, producto de la interacción entre gases volcánicos y la atmosfera, donde el pH puede llegar a ser hasta de 3 y los principales elementos dañinos son el ácido sulfúrico y el ácido nítrico (Ortiz, 1996; Sigurdsson <i>et al.</i>, 2000). Las tormentas eléctricas se producen debido a los gases arrojados por el volcán, que cargan el aire con la valencia de los elementos suspendidos y permiten que se origine en las nubes una mayor conducción eléctrica (Ortiz, 1996; Organización Panamericana de la Salud, 2005). Las</p>

		principales afectaciones que produce la lluvia ácida son el aumento en la acidez del suelo y lixiviación, daños a los cultivos y a los cuerpos de agua, con lo cual se contribuye a la hambruna post-eruptiva. Las tormentas eléctricas aumentan la sensación de alarma entre la población y en el caso de que originen incendios se pueden producir quemaduras y politraumatismos. Además, las tormentas eléctricas facilitan la formación de fuertes aguaceros que pueden desencadenar deslizamientos (Organización Panamericana de la Salud, 2005).
	Contaminación atmosférica y cambio climático	Durante las erupciones se emiten cenizas y gases, de los cuales, los más perjudiciales para el equilibrio atmosférico son el dióxido de azufre (SO ₂) y el ácido clorhídrico (HCl) (Self, 2006), que al reaccionar con el agua formarán ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄), un aerosol que puede permanecer en suspensión hasta 3 años y no permite el paso de la energía solar hacia capas inferiores (Parfitt y Wilson, 2008). Las principales afectaciones que resultan de la contaminación atmosférica y el cambio climático son la disminución de la temperatura, provocando pérdidas en la productividad agrícola y éstas a su vez, pueden desencadenar en hambrunas. Por otra parte, si existe calentamiento, también se esperan afectaciones al crecimiento de los cultivos, además de cambios en los patrones de lluvias, que podrían generar inundaciones.

II.4.3.1.1 Peligros volcánicos primarios

Son el resultado de la actividad volcánica directa, están asociados a la forma en la que se emite el material volcánico (Smith, 2013) y se presentan generalmente con la erupción o posterior a ella, pero en un periodo de tiempo corto (Tilling, 2008).

II.4.3.1.2 Peligros volcánicos secundarios

Se les llama también asociados o inducidos, son generalmente desencadenados o disparados por los peligros volcánicos primarios (Keller et al., 2012). Estos pueden ocurrir durante o después de una erupción o inclusive mucho tiempo después. En algunos casos los peligros volcánicos secundarios pueden ser desencadenados por otros fenómenos naturales como lluvias extraordinarias y sismos (Scott et al., 2001). Estos peligros se

presentan, generalmente, unos acompañados de otros o desencadenando, a su vez, otros (véase tabla 1).

II.4.3.2 Vulnerabilidad

La expectativa de daño o pérdida infligida a un elemento expuesto, se conoce como vulnerabilidad, y está condicionada a la severidad del evento volcánico y las características de los objetos expuestos al evento. Se expresa en porcentaje de daño, referido a la pérdida total para la acción esperada (Dunkley, 1999; Ortiz, 2000; Weichselgartner, 2001; Adger, 2006). La vulnerabilidad representa la susceptibilidad o predisposición física, económica política o social que tiene una comunidad al daño en caso de un fenómeno desestabilizador, en este caso, un peligro volcánico (Cardona, 2003). Existen diversas perspectivas de análisis de la vulnerabilidad, por ejemplo las aproximaciones de manera cualitativa (los factores que nos permiten estimar la capacidad de respuesta de la comunidad al evento volcánico) y de manera cuantitativa (que hace posible medir el impacto directo del fenómeno volcánico en una comunidad y su entorno) (Aceves-Quesada et al., 2007a). Adicionalmente existe el análisis empírico, el cual examina los impactos adversos que los peligros volcánicos provocaron durante erupciones ocurridas en el pasado, y el analítico, el cual se enfoca en las construcciones, evaluando los materiales y diseños usados en la edificación, se calculan los efectos y fallas que se podrían presentar durante erupciones esperadas (Dunkley y Young, 2000).

De acuerdo con Cannon (1994), la evaluación de la vulnerabilidad debe incluir un análisis de: a) la resiliencia, que se define en este caso como la capacidad de resistir el impacto de un peligro y se incluye en este aspecto la capacidad de recuperación; b) la salud médica, que incluye la salud y bienestar de los individuos, pero también las medidas sociales que se toman al respecto, principalmente la medicina preventiva y c) el nivel de preparación del individuo y de la sociedad, que dependen de la protección disponible, de cómo se comporta el individuo de acuerdo a su formación y aprendizaje y a otros factores sociales. Casi 10 años después, Turner II et al. (2003) propusieron un análisis de la vulnerabilidad que se enfoca en tres aspectos diferentes: a) la exposición, la cual implica determinar los componentes y las características del sistema, b) la sensibilidad, es decir, conocer cuáles son las condiciones humanas y ambientales previas del sistema y c) la

resiliencia, la cual se define como la capacidad de un sistema para recuperarse a un estado previo a la perturbación y de mantener ciertas estructuras y funciones básicas (Pimm, 1984) y se evalúa mediante la determinación de los impactos y sus respuestas, a la vez que se identifican los ajustes y las adaptaciones que se realizan para volver a esa condición previa.

Un enfoque más reciente, el análisis espacial de la vulnerabilidad, basado en el modelo SAVE (Spatial Analysis of the Vulnerability Environment) presenta el diseño de un modelo geográfico integral que toma en cuenta múltiples criterios biofísicos y socioeconómicos de la vulnerabilidad, basado en los conceptos de lugar, las relaciones espaciales y los patrones (Morales-Manilla, 2013).

Algunos autores identifican varias dimensiones en la vulnerabilidad, dentro del marco conceptual de riesgo de desastre, estas dimensiones son: a) física, b) social, c) económica y d) ambiental. La vulnerabilidad física es la predisposición de una estructura, infraestructura o servicio a sufrir daños debido a la ocurrencia de un peligro específico. La vulnerabilidad social tiene que ver con la presencia de los seres humanos, individuos o comunidades, así como su capacidad para hacer frente, resistir y recuperarse de los impactos de fenómenos. La vulnerabilidad económica se refiere a la estabilidad económica de una región que, ante la ocurrencia de un peligro, podría provocar pérdida de producción, disminución de ingresos o consumo de bienes. La dimensión ambiental se basa en la interrelación entre los diferentes ecosistemas y su capacidad para hacer frente y recuperarse de los efectos de los peligros y de tolerar factores de estrés en el tiempo y en el espacio (Bollin et al., 2003; Ciurean et al., 2013).

La vulnerabilidad puede expresarse en porcentaje del valor total del elemento expuesto al peligro y se debe calcular para todos los elementos similares (tipos de construcciones, cultivos, etc.), en donde el 0 es "sin daño" y el 1 es "pérdida total" (UNDRO, 1980), aunque también es posible usar valores estadísticos, que se agrupan, generalmente, en tres niveles: ligero (0-20%), moderado (10-60%) y grave (50-100%), los cuales se superponen por la dificultad, en la práctica, de distinguir la diferencia, por ejemplo, del 25 o 35% de daño. Cuando una estructura presenta más del 40% de daños, debe ser destruida, ya que no es rentable su reparación (Ortiz, 2000).

II.4.3.3 Riesgo volcánico

Es el resultado de multiplicar el peligro volcánico, la vulnerabilidad y el valor (Scandone et al., 1993), dónde el valor se refiere a la cantidad de vidas humanas y bienes materiales que se ponen en riesgo durante una erupción volcánica. Generalmente, el riesgo volcánico se mide en pérdida de vidas humanas. Crandell et al. (1984) definen al riesgo volcánico como las consecuencias predecibles de un evento volcánico en términos de daños y pérdida de vidas, destrucción de algunos tipos específicos de propiedad y otras pérdidas económicas.

Debido a que en la mayoría de los casos no es posible reducir el peligro natural, en este caso de tipo volcánico, minimizar el riesgo implica modificar la vulnerabilidad de los elementos expuestos (Cardona, 2003), es decir, en la valoración del riesgo los factores primordiales deben ser de carácter social y económico, tratando de dar más peso a la política regional que a la aproximación científica y técnica de los volcanólogos (Ortiz, 2000).

De acuerdo a Cardona (2003), existen tres niveles de intervención en las políticas públicas para el manejo del riesgo, los cuales son la identificación del riesgo (que incluye la percepción del riesgo, las representaciones sociales y la evaluación objetiva), reducción del riesgo (prevención y mitigación) y manejo del desastre (respuesta inmediata y recuperación).

El riesgo volcánico se debe calcular individualmente para cada peligro, como producto de la probabilidad, la extensión y el efecto; dónde la probabilidad se define como la posibilidad de que un peligro determinado ocurra durante una erupción volcánica; la extensión es la proporción espacial del área de estudio que puede ser afectada por el peligro y; el efecto es el porcentaje de pérdidas en el área de interés (vidas y construcciones) (Magill y Blong, 2005a; b).

II.4.3.4 Desastre volcánico

Ocurre cuando un peligro volcánico provoca una seria interrupción en el funcionamiento de la sociedad, causando graves pérdidas humanas, materiales y ambientales, con lo cual se excede la capacidad de la sociedad afectada para hacer frente sólo con sus propios recursos (UNISDR, 2009). Por tanto, desastre no es sinónimo de fenómeno

natural, más bien implica forzosamente una parte social y una física (Witham, 2005). Se menciona este término, porque es importante que no se confunda con peligro o con riesgo, ya que en ocasiones se usan como sinónimos. El desastre es prevenible al aplicar políticas y estrategias de manejo del riesgo, pero ante la ausencia de éstas el desastre se promueve o se construye (Lavell, 2000; Ruiz-Guadalajara, 2005).

II.4.4 Revisión cuantitativa de la literatura del riesgo volcánico.

El estudio del riesgo volcánico ha tomado gran importancia en las últimas décadas, debido a las considerables víctimas que ha provocado la actividad volcánica alrededor del mundo.

II.4.4.1 Metodología

La búsqueda de artículos se realizó para el intervalo de años de 1995 a 2014, porque el interés de revisión se relaciona con las tendencias de investigación más recientes. La búsqueda se centró en la frase volcanic risk y se realizó con en el buscador Scopus de Science Direct, así como directamente en el catálogo de Elsevier. Dado que se desplegaron más de 1400 registros, éstos se revisaron detenidamente, y nos percatamos que no eran del tema de riesgo volcánico; entonces, se recurrió a acotar la búsqueda con comillas, obteniendo sólo 115 publicaciones. Debido a la baja cantidad de resultados, se decidió incluir también las condicionantes o temas específicos "volcanic hazard" y "volcanic vulnerability", las tres búsquedas también se hicieron en español. Finalmente, también se usó el motor de búsqueda de Google Academic para tratar de encontrar más artículos que no se hubieran identificado previamente.

El manejo de la información recabada se realizó en una hoja de Office Excel 2007, donde las columnas representaban el tipo de información que se deseaba obtener (Tabla II-2). Se agrupó la información en tres principales conjuntos (I, II, III) que fueron:

Tabla II-2

Estructura y arreglo de la información recabada de los artículos.

<u>ID</u>	<u>Nombre del campo</u>	<u>Descripción</u>
I.-	¿Quién, cuándo?	

A	Palabras clave	Son las palabras de búsqueda con que se encontró ese artículo. 3 posibles opciones: "volcanic risk", "volcanic hazard" o "volcanic vulnerability".
B	Autores	Nombre del autor o autores que elaboraron el artículo.
C	Año	En que fue publicado el artículo.
D	Título	Nombre completo del artículo.
E	Revista	Nombre completo de la revista en la cual fue publicado el artículo.
F	Volumen	Volumen de la revista en que fue publicado.
G	Número	Número dentro del volumen de la revista.
H	Páginas	Intervalo de la numeración en la revista.
I	Institución	Institución que publica la revista.
J	País	País donde se ubica la revista o las oficinas centrales.
K	Institución de adscripción del primer autor	Universidad, Centro de Investigación o Dependencia en la cual labora el primer autor del artículo.
L	País donde se encuentra la adscripción del primer autor	El país donde se localiza la institución para la cual el primer autor reportó que trabajaba.
II. Área de estudio, ¿Dónde?		
M	Escala de estudio	En esta celda especificamos si se trata de un volcán, volcanes, campo volcánico, escala mundial, teórico, etc.
N	Continente	En el que se ubicó el estudio físicamente, no el de la pertenencia política.
O	País	En el que se localizó el estudio, con referencia a la pertenencia política.
P	Ubicación	Provincias, estados, islas, nombre regionales o localizaciones más específicas.
Q	América	Se ponía "Si" en caso de que el área de estudio se ubicara en el continente americano.
R	Área en km ²	Área que cubría cada análisis, medida en kilómetros cuadrados. Para la gran mayoría de artículos que no reportaban una cifra del área de cubrimiento, el dato se obtenía de manera aproximada, por medio de dibujar y medir un polígono en Google Earth Pro, apegándose a las características de las áreas delimitadas en los mapas de los artículos. Los estudios con enfoque teórico y mundial no fueron tomados en cuenta para el total.
S	Resolución	Se anotaba en metros cuadrados si se mencionaba en el artículo el tamaño de pixel del modelo digital de elevación o imagen satelital que se haya usado.
III. Tipo de trabajo		

T	Tipo de análisis	La manera en que se desarrolló, cómo se llevó a cabo o los enfoques que tuvo el estudio.
U	Tipo de peligro	El peligro o peligros principales en que se enfocaba el estudio.
V	Tipo de vulnerabilidad	El tipo de daño y afectaciones que puede provocar el o los peligros.

II.4.4.2 Resultados

En las palabras clave de búsqueda se encontraron 115 artículos con el tema "volcanic risk", 44 "volcanic hazard" y 2 "volcanic vulnerability". Del total de los 161 artículos analizados, 7 fueron escritos en español (Ortiz, 1999; Carracedo et al., 2004; Cuevas-Muñiz y Seefoo-Luján, 2005; Macías, 2005; López-Ruiz y Cebriá, 2007; Roldán-Quintana et al., 2011; Vega Mora y Díaz, 2012) y sólo 1 fue escrito en Inglés y Español (Sruoga, 2002).

La búsqueda se concentró en los últimos 20 años (1995-2014). El 55% de los artículos se publicaron en la segunda mitad de ese periodo de tiempo. El año en que más se publicó fue el 2008, probablemente porque hubo un volumen especial en la revista del Journal of Volcanology and Geothermal Research dedicado a la percepción del riesgo volcánico; ese volumen (172) constó de 15 publicaciones, de las cuales 13 se analizan en este trabajo (figura I).

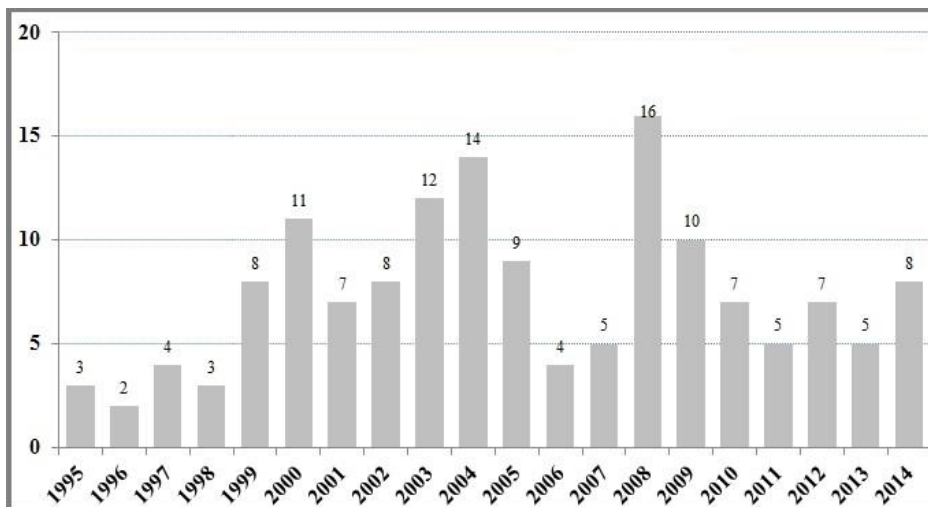


Figura II-1. Número de publicaciones por año.

El artículo con la mayor cantidad de autores fue el escrito por Neri et al. (2008) con 16 autores, seguido de Fonseca et al. (2003) con 14 autores y, finalmente Bertolaso et al. (2009) con 12 autores. La mayoría de artículos fueron escritos por 2 (33 artículos) y 3 (32 artículos) autores, lo cual representa sumando ambos un 40.4% del total de artículos analizados. Empatados en tercer lugar se encuentran 1 autor y 4 autores (26 artículos cada uno) (Figura IIa).

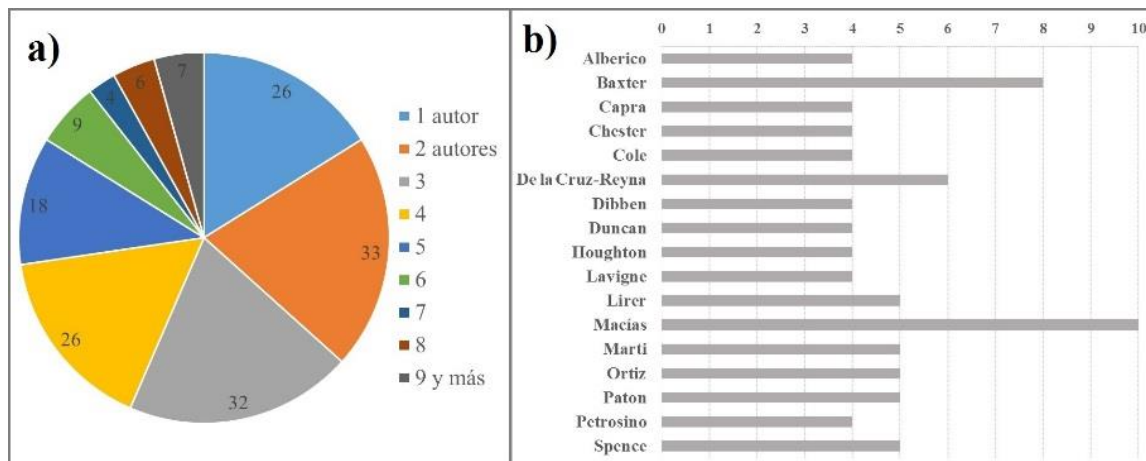


Figura II-2. a) Número de autores por artículo. b) Autores con mayor número de publicaciones respecto al riesgo volcánico.

Los 161 artículos analizados en este trabajo fueron escritos por 430 diferentes autores, de los cuáles, el que más frecuente es Macías (con 10 artículos), seguido de Baxter (8 artículos) y en tercer lugar aparece De la Cruz-Reyna (con 6 artículos) (figura IIb), aclarando que no se tomó en cuenta la posición que ocupaban como autor, sino el número de menciones totales.

Los artículos integrados en esta revisión fueron publicados en 39 revistas diferentes, de las cuales, sólo 8 se publicaron en Español y el resto en Inglés. El 65% (105) de los artículos analizados en este trabajo fueron publicados en la Journal of Volcanology and Geothermal Research, el 18% (29) del total corresponde a la suma de revistas con una sola publicación de interés para este trabajo, y el resto tuvieron entre 2 y 4 artículos por revista (17% acumulado).

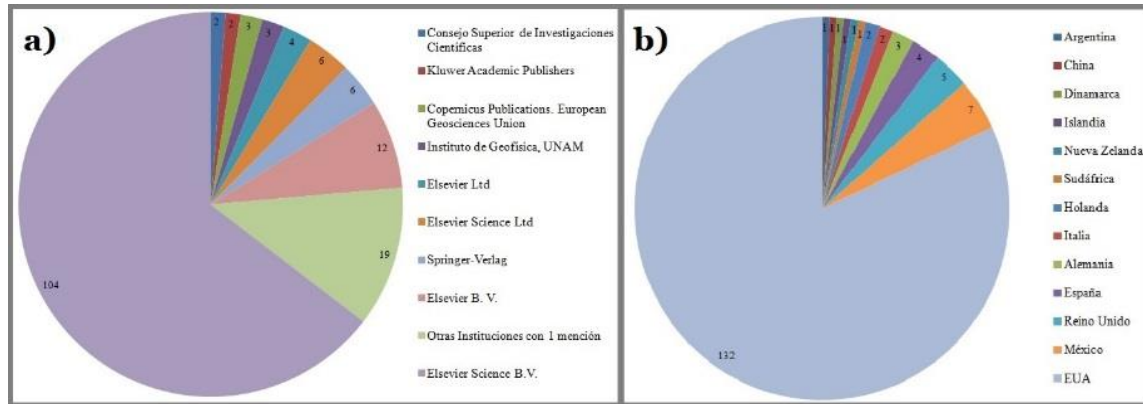


Figura II-3. Número de publicaciones por revista.

En lo que concierne a las editoriales a las que pertenecen las revistas, la mayor cantidad la tuvo Elsevier Science B.V. con 64.6% del total, después otras instituciones con una sola mención que en total suman 11.8% y en tercer lugar Elsevier B. V., con el 7.45% de las menciones. En este caso, se debe mencionar que Elsevier Science B.V. (E.U.A. y Europa) y Elsevier Science Ltd (Asia) se contabilizaron de manera separada, como se muestra en la figura IVa. El país que tiene más cantidad de editoriales con publicaciones de riesgo volcánico fue Estados Unidos de América, con el 82%, seguido de México con el 4.3 % (figura IVb).

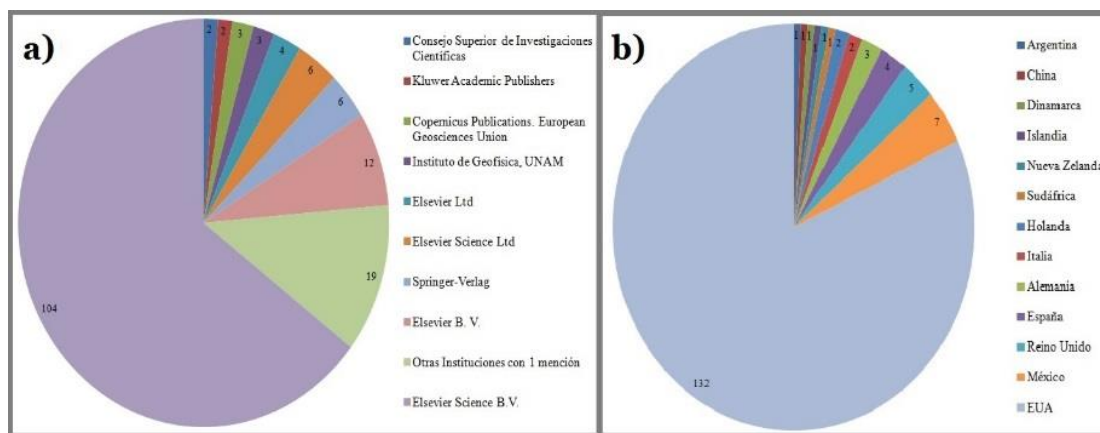


Figura II-4. a) Número de menciones por institución. b) Países a los que pertenecen las instituciones.

La adscripción a la que pertenece el primer autor del artículo fue muy variada, contabilizándose 120 diferentes instituciones. La que más científicos registró fue el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, con 7 publicaciones, seguido del Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Osservatorio Vesuviano, Napoli con 4 artículos, 94 instituciones tuvieron solo una mención, 16 dos menciones y 8 obtuvieron 3 registros. Los países de adscripción del primer autor también fueron variados, pero distribuidos de manera más uniforme en 23 diferentes países, obteniendo el mayor registro Italia con el 21% de autores, seguido de Reino Unido y Estados Unidos Americanos, ambos con 16% de adscripciones cada uno y en tercer lugar México con 11% de científicos que laboraban para instituciones en ese país (figura V).

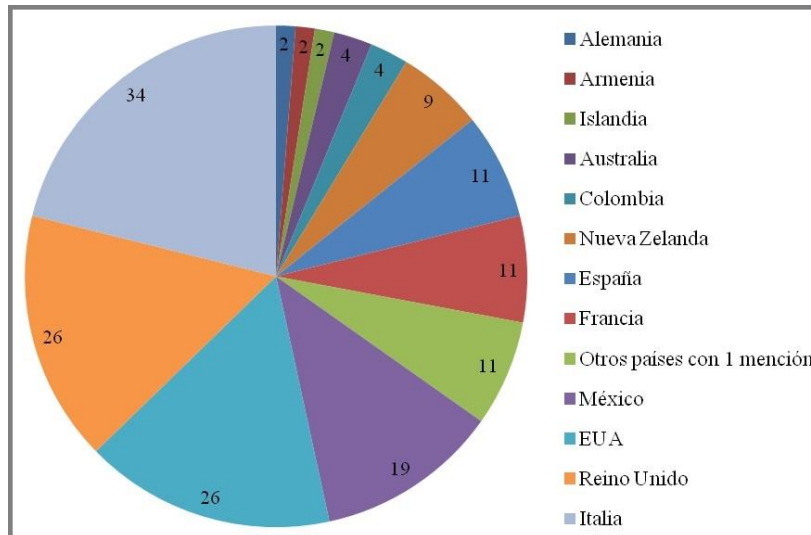


Figura II-5. Países en los que se encuentra adscripto el primer autor.

La escala geográfica de estudio fue principalmente la de un volcán por artículo, lo que representó el 67% de los artículos analizados, seguido del análisis a escala de 2 o más volcanes con el 9.3%, los artículos con enfoque teórico representaron el 8.7% y los estudios enfocados en un campo volcánico obtuvieron el 8%, como se muestra en la figura VI.

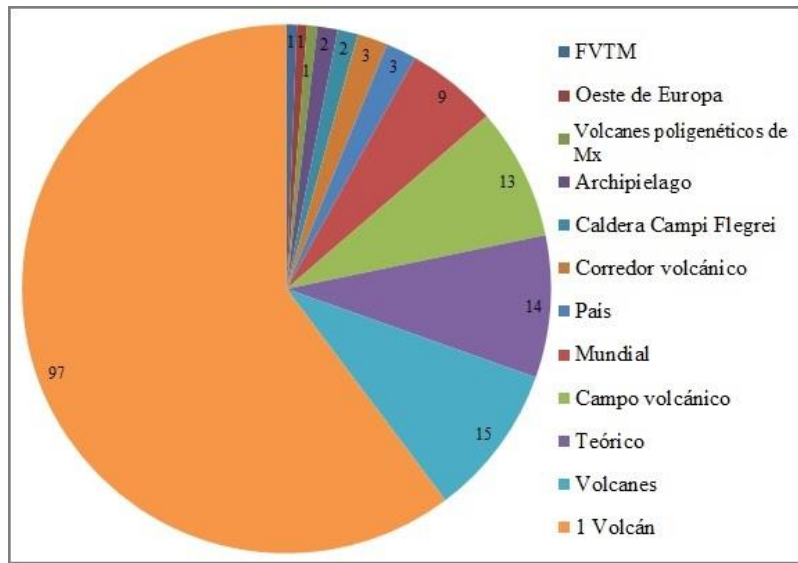


Figura II-6. Principales escalas de estudio reportadas en los artículos. FVTM= Faja Volcánica Trans-Mexicana.

La mayoría de los volcanes estudiados en los artículos se ubican en el continente europeo, con el 35.6% del total, seguido de América con 29.2% y en tercer lugar empatados Asia y los estudios a nivel teórico con el 8.1% (figura VIIa). En lo que concierne al país donde se ubican los volcanes estudiados (columna O), Italia ocupa el primer lugar con 25.4%, seguido de los estudios a nivel teórico o mundial (sin ningún país en específico) con el 14.9% y México en tercer lugar con el 13.6% (figura VIIb).

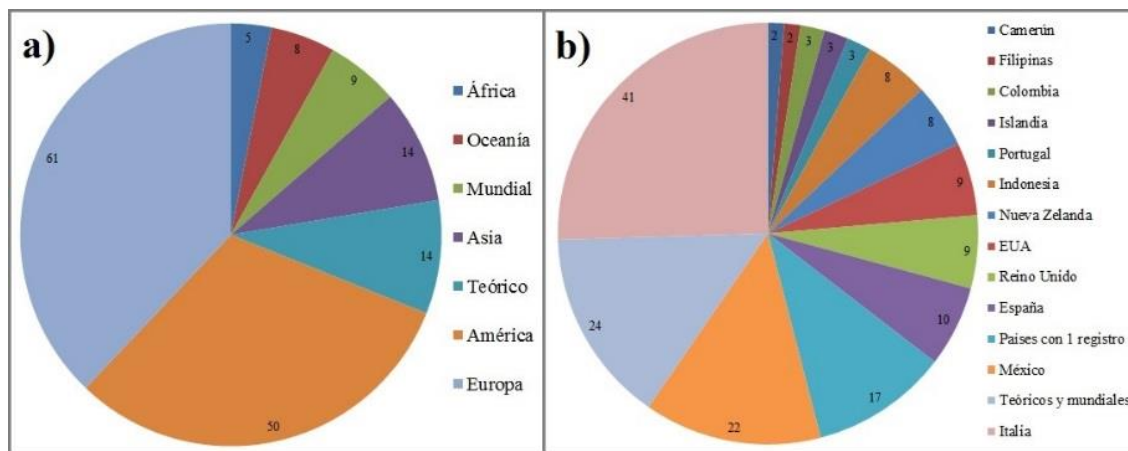


Figura II-7. a) Número de publicaciones por localización de volcanes en los distintos continentes. b) Ubicación por país de los volcanes reportados en los artículos.

Las superficies estudiadas varían y se obtuvieron 116 registros, de los cuales sólo 9 fueron mencionados explícitamente en los artículos. Estas superficies se organizaron en 54 diferentes categorías. Debido a que la variabilidad en las áreas era tan grande, se agrupó en una sola categoría las cantidades que sólo eran usadas o mencionadas por solo un artículo y el 43.1% de los registros cae en esa categoría. El segundo lugar fueron las áreas de 500km², con el 12.9% (volcán Vesubio 9 estudios y 4 del Monte Etna). Los estudios en superficies menores o iguales a 100km² corresponden al 6.8% (4 registros del volcán Soufrière Hills).

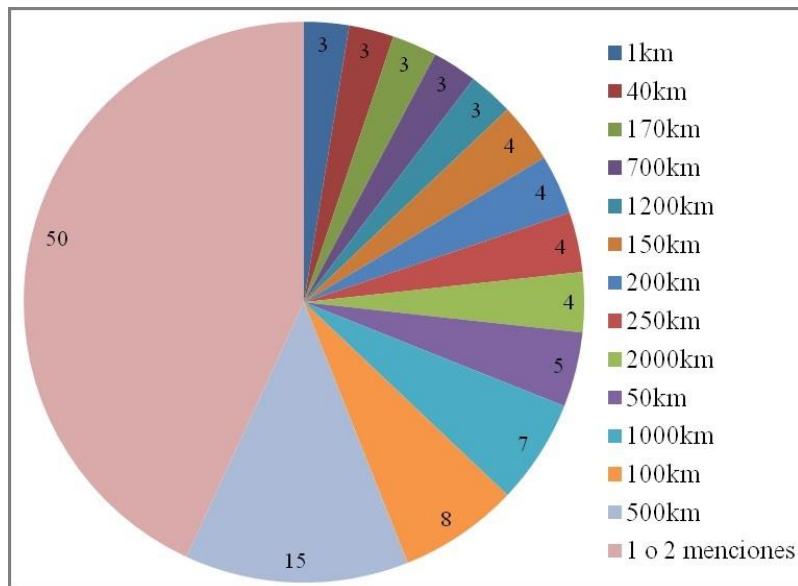


Figura II-8. 116 artículos delimitaron algún área de estudio en sus trabajos, a partir de ellos se crearon 56 distintas categorías, reagrupadas en 14 clases para elaborar esta gráfica.

Sólo 28 trabajos (17.1%) mencionan la resolución espacial de los modelos digitales de elevación o las imágenes satelitales con que trabajaron. Las resoluciones espaciales más frecuentemente utilizadas fueron 10m (7), 30m (6) y 50m (3). El tamaño más pequeño de celda fue de 1m y el más grande de 2000 m.

El tipo de análisis o enfoque varía en cada artículo, y para obtener una representación de los resultados se procedió a agruparlos en 7 diferentes categorías: a)

artículos basados en los estudios geológicos, volcanoestratigráficos y/o geofísicos como base del análisis del riesgo volcánico (50.1%), b) trabajos enfocados a la percepción del riesgo (14.9%), c) artículos enfocados en metodologías y desarrollo de modelos y simulaciones (11.8%), d) estudios teóricos y de revisión (8.7%), e) contribuciones a la política, manejo y gestión del riesgo volcánico (7.5%), e) análisis de la vulnerabilidad (3.1%), f) otros métodos y enfoques con sólo una mención, por ejemplo arqueología, salud, estadística, etc. (3.1%).

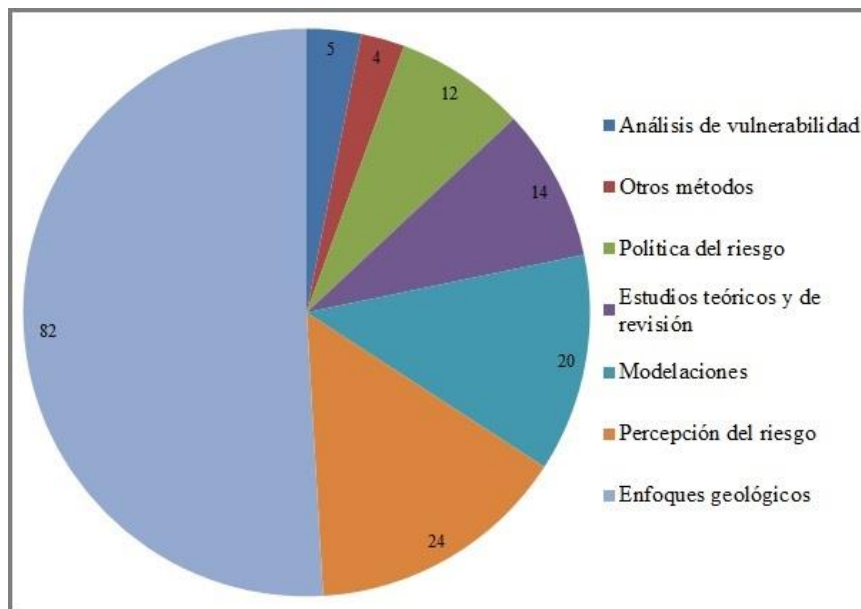


Figura II-9. Número de trabajos por grupo, de acuerdo al principal enfoque usado para llevar a cabo su análisis.

Los artículos que se enfocan en el estudio de un sólo peligro corresponden al 55.2%, los que estudiaron 2 peligros suman un 14.2%, los artículos que se enfocaron en 3 o más peligros contabilizaron el 21.1% y los que no se analizaron ningún peligro en particular ocupan en 9.3%, (estos se enfocaron en el desarrollo de metodologías o trabajos teóricos). A partir de lo anterior, se agruparon el peligro o peligros que más son estudiados (figura X). Los peligros más analizados son los ligados a las erupciones explosivas (14.3%), los flujos piroclásticos (10.6%), los flujos de lava (6.8%), etc. Como se puede apreciar en la figura IX, el 41.6 % de los trabajos presentó sólo un registro,

debido tal vez a que realizaron un análisis por peligros específicos (por ejemplo por fragilidad de la roca) o a que abarcaron una amplia variedad de estos.

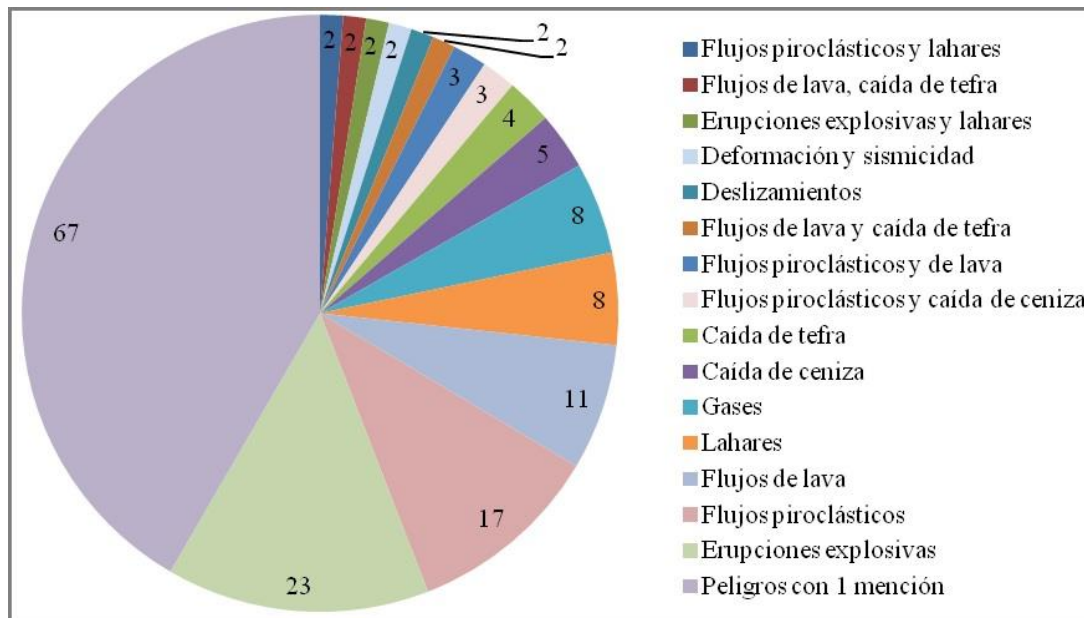


Figura II-10. Principales tipos de peligros reportados en los artículos.

En cuanto al tipo de vulnerabilidad, el 42.2% de los artículos se enfocan en la vulnerabilidad social; es decir, a tratar de cuantificar las personas afectadas que habría en caso de algún desastre. El segundo lugar en números fueron los trabajos enfocados a analizar la vulnerabilidad social y estructural (14.9%), mientras que el 11.2% de los trabajos no reportaron ningún tipo de vulnerabilidad en concreto, ya que no la abordaban o su enfoque era teórico-metodológico (figura XI).

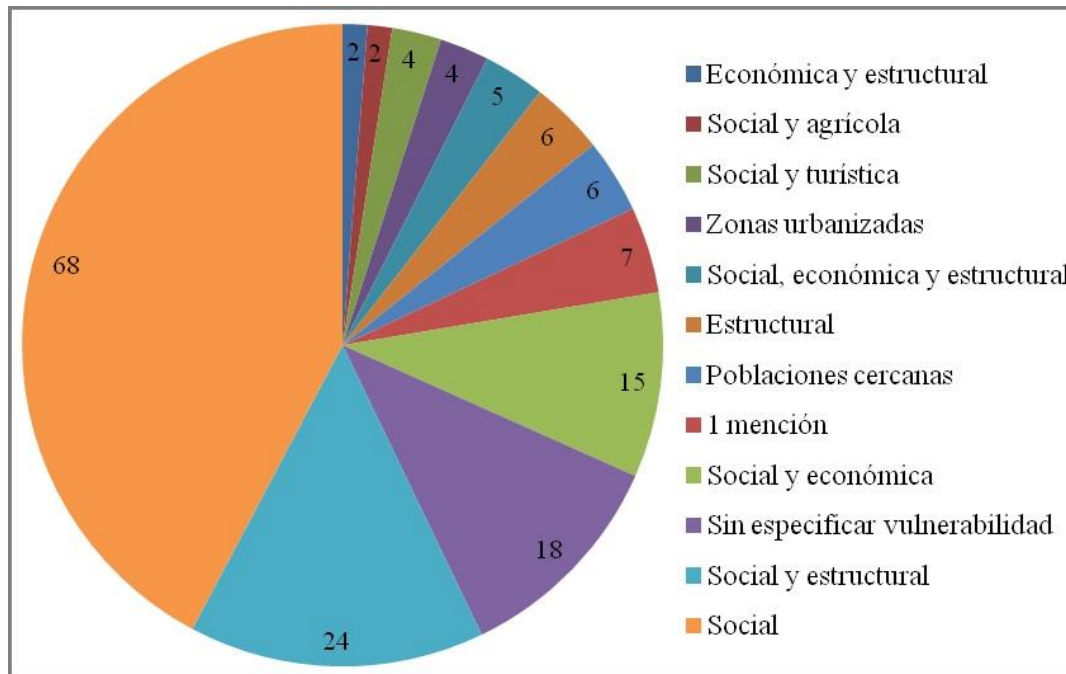


Figura II-11. Enfoques en el análisis de la vulnerabilidad para los distintos trabajos.

II.4.4.3 Perspectivas y retos de trabajo.

La información analizada en los artículos fue muy variada, a pesar de que todos ellos tenían como objetivo principal el análisis del peligro y el riesgo volcánico, lo que permite identificar que los peligros se están estudiando desde diversos enfoques, pero con una base teórico-conceptual común. La aplicación práctica en su área de trabajo, implica realizar ajustes en los procesos de análisis de acuerdo a las necesidades y características propias. En este contexto, sería de gran importancia que existiera una guía que homogenice, al menos en los primeros pasos, la información o el procedimiento para la elaboración de un estudio de riesgo volcánico, en la cual se explique la diferencia entre peligro y riesgo, la importancia de analizar y generar mapas de cada peligro volcánico por separado y que la vulnerabilidad debe tratar de evaluarse desde varios enfoques, para que el resultado final sea un análisis integrado del riesgo.

Al comparar el número de publicaciones por año (figura I) con el registro de eventos volcánicos realizado por el Programa de Vulcanismo Global (Global Volcanism Program, 2013), se observa que en la mayoría de los casos existe una relación directa, ya que el número de publicaciones aumenta cuando hay un mayor número de erupciones volcánicas, aunque en algunos casos no coincide ni en la misma proporción (Figura XIIa),

en este último caso se debe a que los datos adquiridos tardan en ser analizados y o procesados por lo que los resultados tardan en ser publicados.

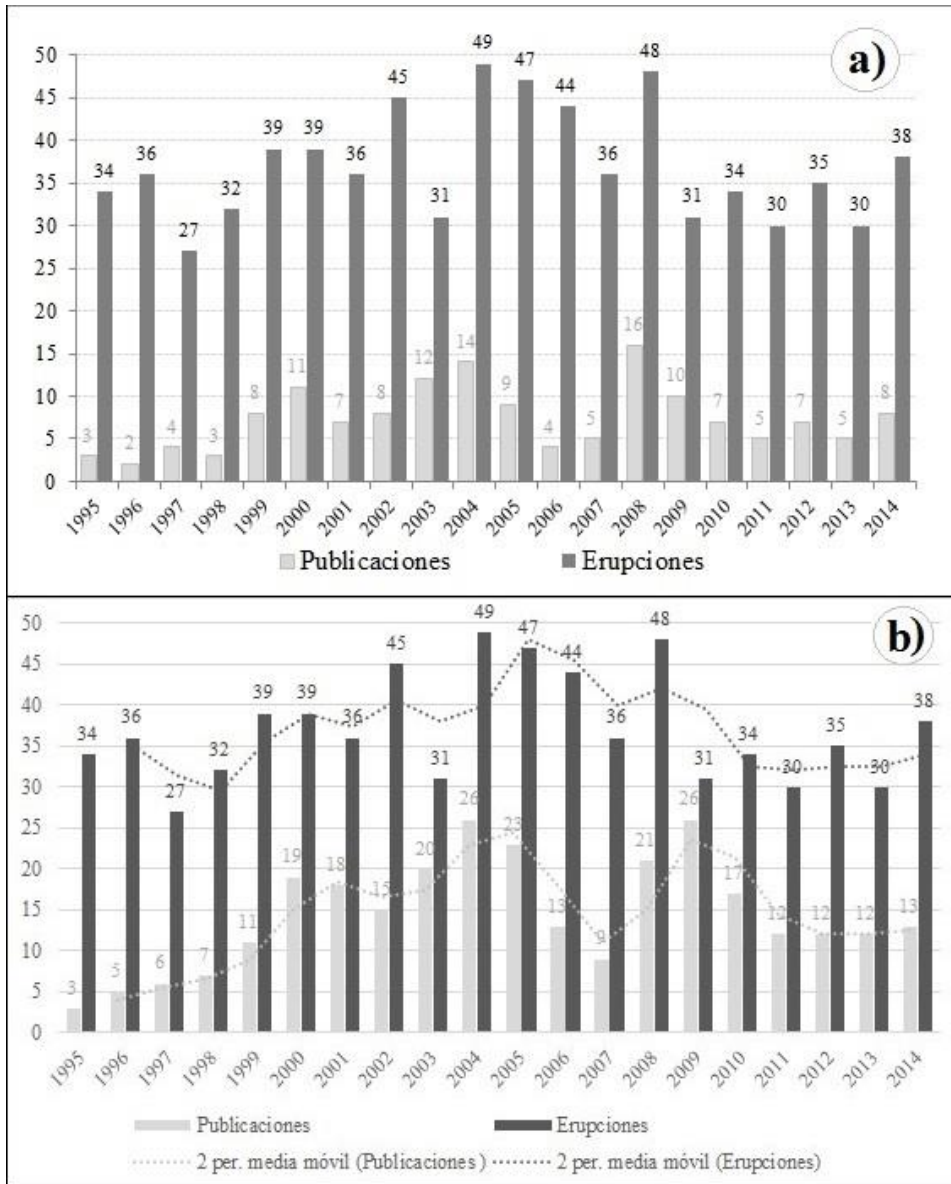


Figura II-12. a) Comparación entre las publicaciones sobre riesgo volcánico (datos de este trabajo) y las erupciones volcánicas anuales (tomado del Global Volcanism Program GVN, 2013). b) Las publicaciones son la suma del año en cuestión y un año previo, para determinar si existe alguna relación más directa con el número de erupciones, ya que las publicaciones generalmente no son inmediatas.

De los 44 trabajos que fueron encontrados usando las palabras clave "volcanic hazard", sólo 4 mencionan las afectaciones que estos peligros pueden tener para la población y sus bienes (Tabla II-2-1), el resto se centra específicamente en estudios geológicos, volcanoestratigráficos, geoquímicos y geofísicos para realizar las determinaciones del peligro (Tabla II-2-2). Uno más, que en el título contenía la palabra riesgo, en su contenido sólo presentó evaluación de peligros volcánicos (tabla II-2-3). Es de llamar la atención que después del 2009 ya no se identificaron trabajos con el enfoque de "volcanic hazard".

Se encontraron sólo dos artículos que hablan específicamente de la vulnerabilidad volcánica ("volcanic vulnerabilty", tabla II-3-4), lo cual representa un tema de investigación emergente con una gran variedad de preguntas por contestar, por ejemplo, hasta qué punto la historia socioeconómica de las poblaciones determina el nivel de vulnerabilidad; cómo se pueden determinar los niveles que tiene un individuo y/o sociedad para prepararse, afrontar, adaptarse o recuperarse de un evento volcánico dañino; las ventajas y desventajas de las diferentes escalas de estudio de la vulnerabilidad, etc.

Tabla II-3: Artículos enfocados en el peligro volcánico y algunas temáticas relacionadas.

Tipo de análisis	Trabajos identificados
1. Afectaciones	(Hill, 2000; Karakhanian <i>et al.</i> , 2002; Aceves-Quesada <i>et al.</i> , 2007b; Marti <i>et al.</i> , 2008)
2. Estudios geológicos	(Fisher, 1995; Carracedo, 1996; Ho, 1996; Graziani <i>et al.</i> , 1997; Hurtado-Artunduaga y Cortés-Jiménez, 1997; Martinelli, 1997; Capra <i>et al.</i> , 1998; Cole <i>et al.</i> , 1999; Gudmundsson <i>et al.</i> , 1999; Camus <i>et al.</i> , 2000; Carn, 2000; Gómez-Fernández, 2000; Gourgaud <i>et al.</i> , 2000; Lavigne <i>et al.</i> , 2000; Castagnolo <i>et al.</i> , 2001; Karner <i>et al.</i> , 2001; Kataoka, 2001; De la Cruz-Reyna y Carrasco-Nuñez, 2002; Stevens <i>et al.</i> , 2002; Crisci <i>et al.</i> , 2003; Cronin <i>et al.</i> , 2003; Crowley <i>et al.</i> , 2003; Funciello <i>et al.</i> , 2003; Karakhanian <i>et al.</i> , 2003; Zimanowski <i>et al.</i> , 2003; Bursik y Reid, 2004; Carn <i>et al.</i> , 2004; Cronin <i>et al.</i> , 2004; Gehring, 2004; Hurst y Smith, 2004; Kilburn, 2004; Lanari <i>et al.</i> , 2004; Rocchi <i>et al.</i> , 2004; Rolandi <i>et al.</i> , 2004; Saucedo <i>et al.</i> , 2005; Vougioukalakis y Fytikas, 2005; Crisci <i>et al.</i> , 2008; Macedonio <i>et al.</i> , 2008; Orsi <i>et al.</i> , 2009)
3. Peligro, no riesgo	(Sruoga, 2002)

4. Vulnerabilidad volcánica	(Dibben y Chester, 1999; Aceves-Quesada <i>et al.</i> , 2007a)
-----------------------------------	--

Respecto a los tipos de análisis con los cuales se abordaban los estudios, el enfoque principal es la determinación de los peligros volcánicos, esto a partir de la caracterización de las erupciones volcánicas o de algún peligro en particular (tabla II-3-1).

El segundo enfoque con más menciones es la percepción del riesgo volcánico y el primer artículo enfocado a evaluarla fue publicado en el año 2000, posteriormente en 2004 fueron publicados otros dos trabajos enfocados a esta misma área y uno más en 2005. Sin embargo, el auge de este enfoque, se encuentra a partir del año 2008, con 30 trabajos sobre la apreciación y el comportamiento que las personas tienen frente al peligro. En esos trabajos los autores coinciden en que con una adecuada educación y preparación se pueden evitar numerosas víctimas (tabla 3).

El uso de nuevos modelos y simulaciones han permitido una mejor y más rápida detección y evaluación de las amenazas, así como de la vulnerabilidad de la población. Sin embargo, es de llamar la atención que a partir del 2008 ya no se siguiera publicando este tipo de trabajos enfocados especialmente en el riesgo volcánico (tabla II-3).

El campo de los estudios teóricos, metodológicos y de revisión estuvo principalmente enfocado a describir y cuantificar los impactos de algunas erupciones volcánicas, así como de los daños causados (tabla II-4).

Tabla II-4: Principales temáticas en las que se enfocan los artículos revisados.

Temática	Artículos
1. Peligros volcánicos	(Fisher, 1995; Ho, 1995; Sheridan y Macías, 1995; Carracedo, 1996; Hurtado-Artunduaga y Cortés-Jiménez, 1997; Martinelli, 1997; Capra <i>et al.</i> , 1998; Lirer y Vitelli, 1998; Cole <i>et al.</i> , 1999; Gudmundsson <i>et al.</i> , 1999; Johnston <i>et al.</i> , 1999; Patella y Mauriello, 1999; Pomonis <i>et al.</i> , 1999; White y Schmincke, 1999; Araña <i>et al.</i> , 2000; Camus <i>et al.</i> , 2000; Carn, 2000; Gourgaud <i>et al.</i> , 2000; Lavigne <i>et al.</i> , 2000; Mastin y Witter, 2000; Thouret <i>et al.</i> , 2000; Chester <i>et al.</i> , 2001; Karner <i>et al.</i> , 2001; Kataoka, 2001; Lirer <i>et al.</i> , 2001; Small y Naumann, 2001; De la Cruz-Reyna y Carrasco-Nuñez, 2002; Karakhanian <i>et al.</i> , 2002; Siebert y G., 2002; Sruoga, 2002; Cronin <i>et al.</i> , 2003; Crowley <i>et al.</i> , 2003; Funicello <i>et al.</i> , 2003;

-
- Karakhanian *et al.*, 2003; Lane *et al.*, 2003; McBirney *et al.*, 2003; Werner *et al.*, 2003; Zimanowski *et al.*, 2003; Bursik y Reid, 2004; Carn *et al.*, 2004; Carracedo *et al.*, 2004; Cronin *et al.*, 2004; Dominey-Howes y Minos-Minopoulos, 2004; Gehring, 2004; Hurst y Smith, 2004; Kilburn, 2004; Lanari *et al.*, 2004; Petrosino *et al.*, 2004; Rocchi *et al.*, 2004; Rolandi *et al.*, 2004; Macías y Siebe, 2005; Magill y Blong, 2005a; b; Saucedo *et al.*, 2005; Aceves-Quesada *et al.*, 2007b; Cubellis *et al.*, 2007; Armienta *et al.*, 2008; Capra *et al.*, 2008; Quiambao, 2008; Bertolaso *et al.*, 2009; Leone y Lesales, 2009; Martí *et al.*, 2009; Rodríguez-Losada *et al.*, 2009; Armienta *et al.*, 2010; Barsotti *et al.*, 2010; Castruccio *et al.*, 2010; Cortés *et al.*, 2010; Alberico *et al.*, 2011; Pasquarè *et al.*, 2011; Roldán-Quintana *et al.*, 2011; Avellán *et al.*, 2012; Capaccioni *et al.*, 2012; Marrero *et al.*, 2012; Vega Mora y Díaz, 2012; D'Alessandro *et al.*, 2013; Gehl *et al.*, 2013; Bartolini *et al.*, 2014; Hicks *et al.*, 2014; Hutchinson *et al.*, 2014; Syahbana *et al.*, 2014)
2. Percepción del riesgo (Bahk y Neuwirth, 2000; Dominey-Howes y Minos-Minopoulos, 2004; Gregg *et al.*, 2004; Vougioukalakis y Fytikas, 2005; Barberi *et al.*, 2008; Carlino *et al.*, 2008; Chester *et al.*, 2008; Dibben, 2008; Gaillard, 2008b; a; Gregg *et al.*, 2008; Haynes *et al.*, 2008; Kelman y Mather, 2008; Lavigne *et al.*, 2008; Paton *et al.*, 2008; Perry y Lindell, 2008; Gavilanes-Ruiz *et al.*, 2009; Limón-Hernández y Macías, 2009; López-Vázquez, 2009; Orsi *et al.*, 2009; Bird *et al.*, 2010; Njome *et al.*, 2010; Sword-Daniels, 2011; Doyle *et al.*, 2013; Ricci *et al.*, 2013; Jenkins *et al.*, 2014; van Manen, 2014)
3. Modelos y simulaciones (Ho, 1996; Graziani *et al.*, 1997; Gómez-Fernández, 2000; Castagnolo *et al.*, 2001; Pareschi *et al.*, 2001; Alberico *et al.*, 2002; Crisci *et al.*, 2003; Jaquet y Carniel, 2003; Spence *et al.*, 2004; Tralli *et al.*, 2005; Damiani *et al.*, 2006; De Natale *et al.*, 2006; Houghton *et al.*, 2006; Felpeto *et al.*, 2007; Crisci *et al.*, 2008; J.-C. *et al.*, 2008; Keating. *et al.*, 2008; Macedonio *et al.*, 2008; Neri *et al.*, 2008)
4. Teoría y nuevas metodologías (Tanguy *et al.*, 1998; Ortiz, 1999; Chester *et al.*, 2002; Macías, 2005; Witham, 2005; López-Ruiz y Cebriá, 2007; Baxter *et al.*, 2008; Cashman y Giordano, 2008; Chester *et al.*, 2008; Gaillard, 2008b; Gudmundsson *et al.*, 2008; Zuccaro *et al.*, 2008; Gottsman *et al.*, 2011; Donovan *et al.*, 2012b)

De acuerdo al análisis de la información obtenida, las principales inquietudes y motivaciones en los estudios del riesgo volcánico consisten en crear métodos que contribuyan a mejorar y agilizar la comunicación entre los científicos y las autoridades encargadas de tomar decisiones, de manera que si existe una respuesta rápida, se pueda evitar un desastre, en esto se han enfocado algunos artículos motivados en la política,

manejo y gestión del riesgo volcánico (Cardona, 1997; Pareschi et al., 2000; Cuevas-Muñiz y Seefoo-Luján, 2005; De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008; Solana et al., 2008; Marzocchi y Woo, 2009; Tilling, 2009; Rolandi, 2010; Donovan et al., 2012a; Marzocchi et al., 2012; Hutter y Lloyd-Bostock, 2013; Donovan y Oppenheimer, 2014). Algunos casos se ven agravados por conflictos de interés, en otros desafortunadamente, se ha aprendido de las desgracias que han ocurrido como en los casos del Chichón, México y Nevado del Ruíz, Colombia (Tilling, 2009).

El caso del análisis de la vulnerabilidad es particular, ya que existen muy pocos trabajos enfocados a analizar, cuantificar y proponer alternativas para la reducción de la vulnerabilidad, ya que el peligro no se puede modificar o eliminar (Dibben y Chester, 1999; Sparks, 2003; Aceves-Quesada et al., 2007a; Marti et al., 2008; Wilson et al., 2014). Este también es un atractivo campo de trabajo, donde aún queda mucho por hacer, y es en este rubro dónde el trabajo interdisciplinario y espacial tiene marcos conceptuales sólidos que pueden contribuir significativamente en el desarrollo de estos temas.

Se identificó un número limitado de trabajos enfocados al análisis del riesgo desde una perspectiva diferente a las anteriormente mencionadas. Llamaban la atención los trabajos de (Hill, 2000; Horwell y Baxter, 2006), los cuales se enfocaron en los efectos en la salud que pueden tener algunos peligros volcánicos. Así como la investigación de Ort et al. (2008) que, a través de métodos arqueológicos, determinó las afectaciones que provocaron dos erupciones volcánicas al norte de Arizona, E.U.A, hace alrededor de 1,100 años, y como las sociedades de esos tiempos se adaptaron a los cambios. También sobresale el trabajo de Mendoza-Rosas y De la Cruz-Reyna (2008), donde usaron métodos estadísticos ligados a series de tiempo geológicas e históricas. Finalmente el trabajo de Stevens et al. (2002) quienes compararon entre los resultados de diversos modelos digitales de elevación para determinar el peligro por lahares.

Tabla II-5: Otros enfoques en los cuales basaron sus estudios algunos artículos.

Enfoque	Artículos
1. Gestión y política del riesgo volcánico	(Cardona, 1997; Pareschi <i>et al.</i> , 2000; Cuevas-Muñiz y Seefoo-Luján, 2005; De la Cruz-Reyna y Tilling, 2008; Solana <i>et al.</i> , 2008; Marzocchi y Woo, 2009; Tilling, 2009; Rolandi, 2010; Donovan <i>et al.</i> , 2012a; Marzocchi <i>et al.</i> , 2012; Hutter y Lloyd-Bostock, 2013; Donovan y Oppenheimer, 2014)

2. Análisis de la vulnerabilidad	(Dibben y Chester, 1999; Sparks, 2003; Aceves-Quesada <i>et al.</i> , 2007a; Marti <i>et al.</i> , 2008; Wilson <i>et al.</i> , 2014)
3. Otros métodos	(Hill, 2000; Stevens <i>et al.</i> , 2002; Horwell y Baxter, 2006; Mendoza-Rosas y De la Cruz-Reyna, 2008; Ort <i>et al.</i> , 2008)

De acuerdo a la figura X, podemos apreciar que los peligros volcánicos en los que más se enfocan los artículos corresponden a las erupciones explosivas y a los flujos piroclásticos, esto puede deberse a que son las actividades eruptivas más inmediatas y que más afectaciones y decesos pueden ocasionar, por tanto es muy recomendable seguir haciendo estudios geológicos y volcanoestratigráficos a detalle para conocer el comportamiento de los volcanes.

II.4.5 Conclusiones

La revisión bibliográfica del presente trabajo sugiere que varios conceptos y términos empleados en el análisis del riesgo volcánico aún se siguen confundiendo y empleando de manera que generan confusión; por eso es importante tener una base conceptual común. El término riesgo volcánico no se refiere sólo a la descripción de la geología volcánica de una zona de interés, sino que implica el análisis de la vulnerabilidad de la infraestructura, recursos naturales, población y con esta integración se pueda hacer una estimación del riesgo.

Debido a que no se tiene el conocimiento sobre el comportamiento de toda la actividad eruptiva del planeta y a que la población aumenta cada día, el análisis del riesgo volcánico es una actividad con un campo de acción aún muy amplio, en el cual cada contribución conceptual, metodológica o de estudio de caso puede ayudar a salvar vidas, y reducir la pérdida recursos naturales e infraestructura. La evaluación del riesgo volcánico implica comprender, lo mejor posible, el proceso que genera el peligro, identificar y cuantificar el nivel de vulnerabilidad de los recursos, infraestructura, población y consecuentemente reconocer el nivel de riesgos.

El 21% de las contribuciones asociadas al estudio del riesgo volcánico se realizaron (durante el periodo analizado) en Italia, podría vincularse a que se encuentra en una de las zonas tectónicas más activas del planeta, pero además sugiere que la sociedad y las instituciones tienen memoria histórica de sus desastres y reconocen la importancia de minimizar los daños y pérdidas que los procesos volcánicos pueden

desencadenar, optado por generar una política pública que promueve el monitoreo, la investigación y por lo tanto la prevención del peligro volcánico, apostando además por la capacitación y educación de la población ante la ocurrencia de un evento volcánico, aspectos clave en el manejo y gestión del riesgo.

Por último, el aumento de los últimos años en los artículos sobre percepción, manejo, gestión, mitigación y política del riesgo nos indican que se está trabajando arduamente en estos aspectos, pero desafortunadamente cada país es tiene diferencias políticas, económicas, y demográficas, por lo cual la elaboración de las políticas y estrategias de gestión del riesgo deben ser particulares y específicas.

II.4.6 Agradecimientos

Al CONACyT por la beca doctoral y al proyecto “Evaluación de la importancia relativa de bosque húmedo de niebla bajo un enfoque de paisaje (0179386)”.

II.5 Los procesos de remoción en masa

Los procesos de remoción en masa (PRM) agrupan a todos aquellos movimientos que involucran la presencia de material que por acción de la gravedad se desplazan cuesta abajo, también se les conoce con otros términos como procesos de ladera o procesos gravitacionales. Penck (1894) describe el término movimiento en masa, como el movimiento bajo la influencia de la gravedad y transporte de masa, que implica el movimiento del material por acción de algún fluido (agua, aire o hielo). Varnes (1958) define los PRM como el movimiento de suelo o sustrato rocoso que moviliza materiales naturales o artificiales. Alcántara-Ayala (2000) los describe como movimientos de masas de suelo, detritos y rocas que ocurren en una ladera como resultado de la influencia directa de la gravedad y que pueden ser desencadenados por factores internos y externos.

Los PRM son controlados por la fuerza de la gravedad, pero en cuanto a la superación de la inercia y el desencadenamiento de los movimientos descendentes existen varios factores que funcionan como disparadores, los principales son el material saturado de agua, exceso de inclinación de las pendientes, eliminación de la vegetación fija y las vibraciones del terreno (Tarbuck y Lutgens, 2004). Otros autores (Varnes, 1978;

Cruden y Varnes, 1996) consideran que las causas de los PRM se deben a factores que contribuyen al incremento del corte de tensión y a la disminución de la resistencia al corte y estos pueden ser internos o externos. Los principales factores internos son la geología, la pendiente, la forma de la ladera, la altura, las propiedades geotécnicas del material que conforma la ladera, la cubierta vegetal y el patrón drenaje; dentro de los factores externos, que generalmente se comportan como aceleradores de los PRM, se consideran las actividades antrópicas como la excavación de laderas o al pie de las laderas, incremento de peso en las laderas, la desecación de los cuerpos de agua (presas), deforestación, irrigación, actividad minera, vibraciones artificiales, etc.

Una de las clasificaciones más aceptadas a nivel internacional es la desarrollada por el Programa Europeo sobre climatología y peligros naturales (EPOCH, 1993), a su vez elaborado en base a las clasificaciones de Varnes (1978) y Hutchinson (1988), las cuales toman como base el mecanismo del movimiento y el material involucrado: desprendimientos, vuelcos o desplomes, deslizamientos, expansiones laterales, flujos y movimientos complejos (tomado de Alcántara-Ayala, 2000).

II.5.1 Caídas o desprendimientos

Se refieren a la caída libre de distintos materiales tales como rocas, detritos o suelos. Estos movimientos ocurren en laderas fuertemente inclinadas, tanto de tipo natural como artificial y se originan por el desprendimiento del material de una superficie inclinada, el cual puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo posteriormente. No se incluyen las pequeñas partículas, resultado del intemperismo. Estos movimientos se definen en base al material involucrado, por lo que se clasifican de manera general en caídas o desprendimiento de rocas, de detritos y de suelos. La velocidad de estos movimientos puede ser rápida o extremadamente rápida, a excepción de cuando la masa desplazada sufre socavamiento o incisión. Las caídas ocurren principalmente en rocas, en los taludes de derrubios no consolidados, rocas detríticas consolidadas, suelos compuestos de material fino, paredes escarpadas, minas o bancos de ríos (depósitos morrénicos), rocas volcánicas antiguas, etc. (Dikau *et al.*, 1996; Alcántara-Ayala, 2000; Hungr *et al.*, 2014).

II.5.2 Vuelcos o desplomes

Consisten en la rotación de una masa de suelo, detritos o roca en torno a un eje determinado por su centro de gravedad. Estos movimientos no implican colapsamiento, por tanto debe haber inclinación o basculamiento hacia adelante o hacia afuera. Se clasifican en vuelcos o desplome de rocas, de derrubios o detritos y de suelos. Las rocas más susceptibles son los esquistos, las calizas, las rocas sedimentarias interbandeadas, basaltos, así como en suelos arcillosos con juntas y también ocurren frecuentemente en materiales que poseen un sistema de discontinuidades preferencial como diaclasas, grietas de tensión o superficies columnares (Varnes, 1978).

II.5.3 Deslizamientos

Ocurren sobre una superficie reconocible de ruptura. La superficie de ruptura define el tipo de deslizamiento, por lo que las superficies curvas o cóncavas se asocian a deslizamientos rotacionales, las superficies de ruptura semi-planas u onduladas a deslizamientos translacionales y las superficies planas a los deslizamientos planos.

En los deslizamientos rotacionales los bloques ubicados en la parte superior se inclinan hacia atrás, el escarpe principal regularmente es vertical, la masa desplazada se acumula ladera abajo y su deformación interna es de muy bajo grado. Si existen movimientos posteriores, pueden dar lugar al retroceso progresivo de la corona. Los deslizamientos translacionales son menos profundos que los rotacionales y al igual que los planos, involucran un movimiento paralelo a la superficie, el cual está en gran medida controlado por superficies de debilidad de los materiales formadores (Dikau et al., 1996; Alcántara-Ayala, 2000).

Los deslizamientos rotacionales se presentan en condiciones de rocas y sedimentos muy fracturados, depósitos morrénicos, regolita y principalmente en áreas desprovistas de vegetación. Los deslizamientos translacionales pueden ocurrir en tres tipos de materiales: rocas, derrubios y suelo (Dikau et al., 1996).

II.5.4 Expansiones laterales

Resultan de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compactos, debido a la licuefacción o fluidización del material subyacente. Ocurren cuando materiales gruesos, como fragmentos de rocas o grava, están inmersos en una matriz de material

más fino o contienen arcillas. La superficie de ruptura no está bien definida, la masa involucrada se mueve rápida y retrogresivamente y puede tener una duración hasta de algunos minutos. Se clasifican en expansiones laterales en rocas, en derrubios y en suelos. Estos movimientos ocurren principalmente en ambientes lacustres y marinos de poca profundidad, sobre material de rocas masivas homogéneas, arcillas, calizas, en áreas de cárcavas, graben o pseudocarso, se pueden asociar a otros movimientos como caída de rocas, flujos de lodo (Dikau et al., 1996; Alcántara-Ayala, 2000).

II.5.5 Flujos

Son movimientos espacialmente continuos, en los que las superficies de cizalla son muy someras. Este movimiento es muy parecido al de un fluido viscoso, por tanto su velocidad no es homogénea y da lugar a la formación de lóbulos a partir del predominio del movimiento intergranular. Los flujos incluyen todos los tipos de materiales disponibles y se clasifican en flujos de rocas, derrubios y arena o suelo. Los flujos de rocas aparecen comúnmente en rocas débiles, metamórficas, gneis, y materiales finos. Los flujos de derrubios tienen lugar sobre materiales poco consolidados, como el coluvión, rocas intemperizadas, material morreico ligeramente consolidado. Los flujos de suelo se desarrollan en material de grano fino y raramente lo hacen en material de clastos gruesos (Dikau et al., 1996; Alcántara-Ayala, 2000; Tarbuck y Lutgens, 2004).

II.5.6 Movimientos complejos

Ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo. Los más importantes son los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes.

Cuando existe una movilización a gran distancia de grandes masas de rocas y detritos que viajan a gran velocidad se nombran avalanchas o aludes de rocas. El colapso repentino y de gran extensión de una masa de material granular o de detritos que viaja a velocidades rápidas o extremadamente rápidas se llama flujo deslizante, en este caso el material involucrado es metaestable, con una estructura suelta y alta porosidad. Durante el colapso, la carga del terreno es transferida a los fluidos de los poros (generalmente agua), lo que ocasiona un incremento en la presión de estos últimos y, por consiguiente

hay una pérdida de resistencia, ocasionando el flujo deslizante (Hutchinson, 1988). Por lo general, la morfología resultante es alargada y estrecha, y el área de depósito tiene un espesor relativamente bajo (EPOCH, 1993).

II.6 Bibliografía

- Aceves-Quesada, J. F., Díaz-Salgado, J. y López-Blanco, J. 2007a. Vulnerability assessment in a volcanic risk evaluation in Central Mexico through a multi-criteria-GIS approach. *Natural Hazards*, 40, 339-356.
- Aceves-Quesada, J. F., Martín-Del Pozzo, A. L. y López-Blanco, J. 2007b. Volcanic hazards zonation of the Nevado de Toluca Volcano, Central Mexico. *Natural Hazards*, 41, 159-180.
- Alberico, I., Lirer, L., Petrosino, P. y Scandone, R. 2002. A methodology for the evaluation of long-term volcanic risk from pyroclastic flows in Campi Flegrei (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 116, 63-78.
- Alcántara-Ayala, I. 2000. ¿Landslides: deslizamientos o movimientos del terreno? *Investigaciones Geográficas. Instituto de Geografía, UNAM, México*, 41, 7-25.
- Alcántara-Ayala, I. 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47, 107-124.
- Bahk, C. M. y Neuwirth, K. 2000. Impact of movie depictions of volcanic disaster on risk perception and judgements. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 18, 63-84.
- Barberi, F., Davis, M. S., Isaia, R., Nave, R. y Ricci, T. 2008. Volcanic risk perception in the Vesuvius population. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 244-258.
- Baxter, P. J., Neri, A. y Blong, R. 2008. Evaluating explosive eruption risk at European volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, V-IX.
- Bignami, C., Bosi, V., Costantini, L., Cristiani, C., Lavigne, F. y Thierry, P. E. 2012. *Handbook for volcanic risk management: Prevention, crisis management, resilience*, Orleans, France, European Commission.
- Bird, D. K., Gisladdottir, G. y Dominey-Howes, D. 2010. Volcanic risk and tourism in southern Iceland: Implications for hazard, risk and emergency response education and training. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189, 33-48.
- Cardona, D. O. 1997. Management of the volcanic crises of Galeras volcano: Social, economic and institutional aspects. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 77, 313-324.
- Carlino, S., Somma, R. y Mayberry, G. C. 2008. Volcanic risk perception of young people in the urban areas of Vesuvius: Comparisons with other volcanic areas and implications for emergency management. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 229-243.
- Cashman, K. V. y Giordano, G. 2008. Volcanoes and human history. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 325-329.
- Castagnolo, D., Gaeta, F. S., De Natale, G., Peluso, F., Mastrolorenzo, G., Troise, C., Pingue, F. y Mita, D. G. 2001. Campi Flegrei unrest episodes and possible evolution towards critical phenomena. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 109, 13-40.
- Crisci, G. M., Di Gregorio, S., Rongo, R., Scarpelli, M., Spataro, W. y Calvari, S. 2003. Revisiting the 1669 Etnean eruptive crisis using a cellular automata model and implications for volcanic hazard in the Catania area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 123, 211-230.
- Crisci, G. M., Iovine, G., Di Gregorio, S. y Lupiano, V. 2008. Lava-flow hazard on the SE flank of Mt. Etna (Southern Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 778-796.

- Cruden, D. M. y Varnes, D. J. 1996. Landslide Types and Processes. In: TURNER, K. & SCHUSTER, R. L. (eds.) *Landslides-Investigation and Mitigation*. USA: National Research Council.
- Cuevas-Muñiz, A. y Seefoo-Luján, J. L. 2005. Reubicación y desarticulación de La Yerbabuena: Entre el riesgo volcánico y la vulnerabilidad política. *Desacatos*, 19, 41-70.
- Chester, D. K., Dikken, C. J. L. y Duncan, A. M. 2002. Volcanic hazard assessment in western Europe. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115, 411-435.
- Chester, D. K., Duncan, A. M. y Dikken, C. J. L. 2008. The importance of religion in shaping volcanic risk perception in Italy, with special reference to Vesuvius and Etna. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 216-228.
- Damiani, M. L., Groppelli, G., Norini, G., Bertino, E., Gigliuto, A. y Nucita, A. 2006. A lava flow simulation model for the development of volcanic hazard maps for Mount Etna (Italy). *Computers & Geosciences* 32, 512-526.
- De La Cruz-Reyna, S. y Tilling, R. I. 2008. Scientific and public responses to the ongoing volcanic crisis at Popocatepetl Volcano, Mexico: Importance of an effective hazards-warning system. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 170, 121-134.
- De Natale, G., Troise, C., Pingüe, F., Mastrolorenzo, G. y Pappalardo, L. 2006. The Somma-Vesuvius volcano (Southern Italy): Structure, dynamics and hazard evaluation. *Earth-Science Reviews* 74, 73-111.
- Dikken, C. y Chester, D. K. 1999. Human vulnerability in volcanic environments: the case of Furnas, Sao Miguel, Azores. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 92, 133-150.
- Dikken, C. J. L. 2008. Leaving the city for the suburbs—The dominance of 'ordinary' decision making over volcanic risk perception in the production of volcanic risk on Mt Etna, Sicily. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 288-299.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L. y Ibsen, M.-L. 1996. *Landslide Recognition. Identification, Movement and Causes*, Chichester, U. K. , Wiley and Son.
- Dominey-Howes, D. y Minos-Minopoulos, D. 2004. Perceptions of hazard and risk on Santorini. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 137, 285-310.
- Donovan, A. R. y Oppenheimer, C. 2014. Science, policy and place in volcanic disasters: Insights from Montserrat. *Environmental Science & Policy*, 39, 150-161.
- Donovan, A. R., Oppenheimer, C. y Bravo, M. 2012a. Contested boundaries: Delineating the "safe zone" on Montserrat. *Applied Geography* 35, 508-514.
- Donovan, A. R., Oppenheimer, C. y Bravo, M. 2012b. The use of belief-based probabilistic methods in volcanology: Scientists' views and implications for risk assessments. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 247-248, 168-180.
- Doyle, E. E. H., McClure, J., Johnston, D. M. y Paton, D. 2013. Communicating likelihoods and probabilities in forecasts of volcanic eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 271, 1-15.
- Epoch 1993. Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community. In: FLAGEOLLET, J. C. (ed.).
- Felpeto, A., Martí, J. y Ortiz, R. 2007. Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 166, 106-116.
- Gaillard, J.-C. 2008a. Alternative paradigms of volcanic risk perception: The case of Mt. Pinatubo in the Philippines. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 315-328.
- Gaillard, J.-C. 2008b. Volcanic risk perception and beyond. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 163-169.
- Gavilanes-Ruiz, J. C., Cuevas-Muñiz, A., Varley, N., Gwynne, G., Stevenson, J., Saucedo-Girón, R., Pérez-Pérez, A., Aboukhalil, M. y Cortés-Cortés, A. 2009. Exploring the factors that influence the perception of risk: The case of Volcán de Colima, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 186, 238-252.

Global-Volcanism-Program 2013. Volcanoes of the World, v. 4.4.1. Venzke, E. (ed.). Smithsonian Institution. Descargado el 26 de octubre de 2015. <http://dx.doi.org/10.5479/si.GVP.VOTW4-2013>

- Gómez-Fernández, F. 2000. Application of a GIS algorithm to delimit the areas protected against basic lava flow invasion on Tenerife Island. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103, 409-423.
- Gottsmann, J., De Angelis, S., Fournier, N., Van Camp, M., Sacks, S., Linde, A. y Ripepe, M. 2011. On the geophysical fingerprint of vulcanian eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 306, 98-104.
- Graziani, G., Martilli, A., Pareschi, M. T. y Valenza, M. 1997. Atmospheric dispersion of natural gases at Vulcano island. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 75, 283-308.
- Gregg, C. E., Houghton, B. F., Johnson, D. M., Paton, D. y Swanson, D. A. 2004. The perception of volcanic risk in Kona communities from Mauna Loa and Hualalai volcanoes, Hawaii. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 130, 179-196.
- Gregg, C. E., Houghton, B. F., Paton, D., Swanson, D. A., Lachman, R. y Bonk, W. J. 2008. Hawaiian cultural influences on support for lava flow hazard mitigation measures during the January 1960 eruption of Kīlauea volcano, Kapoho, Hawai'i. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 300-307.
- Gudmundsson, M. T., G., L., Höskuldsson, Á. y Gylfason, Á. G. 2008. Volcanic hazards in Iceland. *Jökull*, 58, 251-268.
- Haynes, K., Barclay, J. y Pidgeon, N. 2008. Whose reality counts? Factors affecting the perception of volcanic risk. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 259-272.
- Hill, P. M. 2000. Possible asphyxiation from carbon dioxide of a cross-country skier in eastern California: a deadly volcanic hazard. *Wilderness and Environmental Medicine*, 11, 192-195.
- Ho, C.-H. 1996. Volcanic time-trend analysis *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 74, 171-177.
- Horwell, C. J. y Baxter, P. J. 2006. The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of Volcanology*, 69, 191-233.
- Houghton, B. F., Bonadonna, C., Gregg, C. E., Johnson, D. M., Cousins, W. J., Cole, J. W. y Del Carlo, P. 2006. Proximal tephra hazards: Recent eruption studies applied to volcanic risk in the Auckland volcanic field, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 155, 138-149.
- Hungr, O., Leroueil, S. y Picarelli, L. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslide*, 11, 167-194.
- Hutchinson, J. N. General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: BONNARD, C., ed. Fifth International Symposium on Landslides, 1988 Balkema, Rotterdam, Netherlands. 3-35.
- Hutter, B. M. y Lloyd-Bostock, S. 2013. Risk, interest groups and the definition of crisis: the case of volcanic ash. *The British Journal of Sociology* 64, 383-404.
- J.-C., K., Legendre, Y., Caron, B. y Boudon, G. 2008. Reconstruction and analysis of sub-plinian tephra dispersal during the 1530 A.D. Soufrière (Guadeloupe) eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 491-515.
- Jaquet, O. y Carniel, R. 2003. Multivariate stochastic modelling: towards forecasts of paroxysmal phases at Stromboli. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 128, 261-271.
- Jenkins, S. F., Spence, R. J. S., Fonseca, J. F. B. D., Solidum, R. U. y Wilson, T. M. 2014. Volcanic risk assessment: Quantifying physical vulnerability in the built environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 276, 105-120.

- Karakhanian, A., Djrbashian, R., Trifonov, V., Philip, H., Arakelian, S. y Avagian, A. 2002. Holocene-historical volcanism and active faults as natural risk factors for Armenia and adjacent countries. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 319-344.
- Keating., G. N., Pelletier, J. D., Valentine, G. A. y Statham, W. 2008. Evaluating suitability of a tephra dispersal model as part of a risk assessment framework. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 177, 379-404.
- Kelman, I. y Mather, T. A. 2008. Living with volcanoes: The sustainable livelihoods approach for volcano-related opportunities. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 189-198.
- Lavigne, F., De Coste, B., Juvin, N., Flohic, F., Gaillard, J.-C., Texier, P., Morin, J. y Sartohadi, J. 2008. People's behaviour in the face of volcanic hazards: Perspectives from Javanese communities, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 273-287.
- Lavigne, F., Thouret, J. C., Voight, B., Suwa, H. y Sumaryono, A. 2000. Lahars at Merapi volcano, Central Java: an overview. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 100, 423-456.
- Limón-Hernández, C. y Macías, J. L. 2009. Volcanic hazards and risk perception at the "Zoque" community of Chapultenango: El Chichón volcano, Chiapas, México. *Geofísica Internacional*, 48, 113-132.
- Lookwood, J. P. y Hazlett, R. W. 2010. *Volcanoes: global perspectives*, United Kingdom.
- López-Ibor, J. J. 2005. What is a disaster? In: LÓPEZ-IBOR, J. J., CHRISTODOULOU, G., MAJ, M., SARTORIUS, N. & OKASHA, A. (eds.) *Disasters and Mental Health*. England: John Wiley & Sons.
- López-Ruiz, J. y Cebriá, J. M. 2007. Procesos y riesgos volcánicos. *Estudios Geológicos*, 63, 41-65.
- López-Vázquez, E. 2009. Risk perception and coping strategies for risk from Popocatepetl Volcano, Mexico. *Geofísica Internacional*, 48, 133-147.
- Macedonio, G., Costa, A. y Folch, A. 2008. Ash fallout scenarios at Vesuvius: Numerical simulations and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 366-377.
- Macías, J. L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57, 379-424.
- Marti, J., Spence, R., Calogero, E., Ordoñez, A., Felpeto, A. y Baxter, P. 2008. Estimating building exposure and impact to volcanic hazards in Icod de los Vinos, Tenerife (Canary Islands). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 553-561.
- Marzocchi, W., Newhall, C. y Woo, G. 2012. The scientific management of volcanic crises. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 247-248, 181-189.
- Marzocchi, W. y Woo, G. 2009. Principles of volcanic risk metrics: Theory and the case study of Mount Vesuvius and Campi Flegrei, Italy. *Journal Of Geophysical Research*, 114, 12.
- Mendoza-Rosas, A. T. y De La Cruz-Reyna, S. 2008. A statistical method linking geological and historical eruption time series for volcanic hazard estimations: Applications to active polygenetic volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 277-290.
- Neri, A., Aspinall, W. P., Cioni, R., Bertagnini, A., Baxter, P. J., Zuccaro, G., Andronico, D., Barsotti, S., Cole, P. D., Esposti Ongaro, T., Hincks, T. K., Macedonio, G., Papale, P., Rosi, M., Santacroce, R. y Woo, G. 2008. Developing an Event Tree for probabilistic hazard and risk assessment at Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 397-415.
- Njome, M. S., Suh, C. E., Chuyong, G. y De Wit, M. J. 2010. Volcanic risk perception in rural communities along the slopes of mount Cameroon, West-Central Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 58, 608-622.
- Oea 1993. Manual Sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. In: AMERICANOS, D. D. D. R. Y. M. A. S. E. P. A. E. Y. S. O. D. E.

- (ed.) *Una Contribución al Decenio Internacional para la Reducción de Desastres Naturales*. Washington, D.C.: Organización de los Estados Americanos.
- Organización-Panamericana-De-La-Salud. 2005. Guía de preparativos de salud frente a erupciones volcánicas. Módulo 4: Salud ambiental y el riesgo volcánico. Quito, Ecuador: Área de Preparativos para Situaciones de Emergencia y Socorro en Casos de Desastre. Organización Mundial de la Salud.
- Orsi, G., Di Vito, M. A., Selva, J. y Marzocchi, W. 2009. Long-term forecast of eruption style and size at Campi Flegrei caldera (Italy). *Earth and Planetary Science Letters*, 287, 265-276.
- Ort, M. H., Elson, M. D., Anderson, K. C., Duffield, W. A. y Samples, T. L. 2008. Variable effects of cinder-cone eruptions on prehistoric agrarian human populations in the American southwest. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 363-376.
- Ortiz, R. 1996. *Riesgo volcánico*, Servicio de publicaciones del Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote.
- Ortiz, R. 1999. ¿Cuándo y cómo se producirá una erupción? *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 7, 210-221.
- Ortiz, R. 2000. Riesgo volcánico. In: ASTIZ, M. & GARCÍA, A. (eds.) *Curso Internacional de Volcanología y Geofísica Volcánica*. Servicio de publicaciones del Exmo. Cabildo Insular de Lanzarote.
- Papale, P. E. 2014. *Volcanic Hazards, Risks and Disasters*, Elsevier.
- Pareschi, M. T., Cavarra, L., Favalli, M., F., G. y A., M. 2000. GIS and Volcanic Risk Management. *Natural Hazards* 21, 361-379.
- Pareschi, M. T., Ranci, M., Valenza, M. y Graziani, G. 2001. Atmospheric dispersion of volcanic CO₂ at Vulcano island. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 108, 209-235.
- Parfitt, E. y Wilson, L. 2008. *Fundamentals of physical volcanology*, Malden, Mass., EUA, Blackwell.
- Paton, D., Smith, L., Daly, M. y Johnston, D. 2008. Risk perception and volcanic hazard mitigation: Individual and social perspectives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 179-188.
- Penck, A. 1894. Morphologie der Erdoberfläche. 471 and 696.
- Perry, R. W. 2007. What Is a Disaster? In: RODRÍGUEZ, H., QUARANTELLI, E. L. & DYNES, R. R. (eds.) *Handbook of Disaster Research*. New York, USA: Springer Science.
- Perry, R. W. y Lindell, M. K. 2008. Volcanic risk perception and adjustment in a multi-hazard environment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 170-178.
- Ricci, T., Barberi, F., Davis, M. S., Isaia, R. y Nave, R. 2013. Volcanic risk perception in the Campi Flegrei area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 254, 118-130.
- Rolandi, G. 2010. Volcanic hazard at Vesuvius: An analysis for the revision of the current emergency plan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 189, 347-362.
- Romero, G. y Maskrey, A. 1993. Como entender los desastres naturales. In: MASKREY, A. (ed.) *Los desastres no son naturales*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- Self, S. 2006. The effects and consequences of very large explosive volcanic eruptions. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 364, 2073-2097.
- Sigurdsson, H., Houghton, B. F., McNutt, S. R., Rymer, H. y Stix, J. 2000. *Encyclopedia of Volcanoes*, San Diego, Academic Press.
- Smith, G. A. y Fritz, W. J. 1989. Volcanic influences on terrestrial sedimentation. *Geology*, 17, 375-376.
- Smith, P. J. 1976. Sounds volcanic. *Nature*, 263, 93.
- Solana, M. C., Kilburn, C. R. J. y Rolandi, G. 2008. Communicating eruption and hazard forecasts on Vesuvius, Southern Italy. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 172, 308-314.

- Sparks, R. S. J. 2003. Forecasting volcanic eruptions. *Earth and Planetary Science Letters*, 210, 1-15.
- Spence, R. J. S., Baxter, P. J. y Zuccaro, G. 2004. Building vulnerability and human casualty estimation for a pyroclastic flow: a model and its application to Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 133, 321-343.
- Sruoga, P. 2002. El volcanismo reciente y riesgo asociado en la provincia de Mendoza. *IANIGLA, 30 años de investigación básica y aplicada en Ciencias Ambientales*, 255-260.
- Stevens, N. F., Manville, V. y Heron, D. W. 2002. The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitised map contours and interferometric SAR at Ruapehu and Taranaki volcanoes, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 119, 89-105.
- Sword-Daniels, V. 2011. Living with Volcanic Risk: The Consequences of, and Response to, Ongoing Volcanic Ashfall on Montserrat. *New Zealand Journal of Psychology*, 40, 131-138.
- Tanguy, J.-C., Ribière, C., Scarth, A. y Tjetjep, W. S. 1998. Victims from volcanic eruptions: a revised database. *Bulletin of Volcanology*, 60, 137-144.
- Tar buck, E. J. y Lutgens, F. K. 2004. *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la Geología Física*, Madrid Editorial Pearson - Prentice Hall.
- Tilling, R. I. 2008. Volcano hazards. In: MARTI, J. & ERNST, G. G. J. (eds.) *Volcanoes and the Environment*. Cambridge University Press.
- Tilling, R. I. 2009. El Chichón's "surprise" eruption in 1982: Lessons for reducing volcano risk. *Geofísica Internacional*, 48, 3-19.
- Tralli, D. M., Blom, R. G., Zlotnicki, V., Donnellan, A. y Evans, D. L. 2005. Satellite remote sensing of earthquake, volcano, flood, landslide and coastal inundation hazards. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 59, 185-198.
- Van Manen, S. M. 2014. Hazard and risk perception at Turrialba volcano (Costa Rica); implications for disaster risk management. *Applied Geography* 50, 63-73.
- Varnes, D. J. 1958. Landslide type and processes. In: ECKEL, E. B. (ed.) *Landslides and engineering practice*. Washington, D.C: Highway Research Board.
- Varnes, D. J. 1978. Slope movement types and processes. In: SCHUSTER, R. L. & KRIZEK, R. J. (eds.) *Landslides—Analysis and control: National Research Council*. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Vougioukalakis, G. E. y Fytikas, M. 2005. Volcanic hazards in the Aegean area, relative risk evaluation, monitoring and present state of the active volcanic centers. *Developments in Volcanology*, 7, 161-183.
- Wilson, G., Wilson, T. M., Deligne, N. I. y Cole, J. W. 2014. Volcanic hazard impacts to critical infrastructure: A review. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 286, 148-182.
- Witham, C. S. 2005. Volcanic disasters and incidents: A new database. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 148, 191-233.
- Wright, S. B. 1997. Northridge Earthquake: Property tax relief. In: LEGISLATION, D. (ed.). Washington, DC: White House.
- Zuccaro, G., Cacace, F., Spence, R. J. S. y Baxter, P. J. 2008. Impact of explosive eruption scenarios at Vesuvius. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178, 416-453.



DETAILED GEOMORPHOLOGY OF DEBRIS AVALANCHES OF EL ESTRIBO VOLCANIC COMPLEX (CENTRAL MEXICO)

Tesis

**Análisis del riesgo por procesos de remoción en masa
en ambientes volcánicos: El Estribo, Pátzcuaro,
Michoacán, México**



Detailed geomorphology of debris avalanches of El Estribo volcanic complex (Central Mexico)

Gemma Gómez Castillo ^a, Manuel E. Mendoza ^{b*} and José Luis Macías ^c.

^a Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México. E-mail: ggomez@pmip.unam.mx

^b Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México. E-mail: mmendoza@ciga.unam.mx

^c Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México. E-mail: macias@geofisica.unam.mx

*Corresponding author

(Artículo aceptado en la revista Journal of Maps)

Abstract

The El Estribo volcanic complex, located to the south of Pátzcuaro Lake, forms an elevation based on a shield volcano crowned by a cinder cone. Two debris avalanches, dated at 28,000 and 14,000 ybp, cover an area of 4 km² with a typical hummocky topography. The zone is a state natural protected area without studies of hazard and risk from mass movement processes. Herein, we present a detailed geomorphological map of the debris avalanche area, scale 1:20,000. The approach applied used two hierarchical levels, geomorphological landscapes and landforms. The fault scarp was mapped from high resolution digital elevation models obtained from unmanned aerial vehicles (UAV) survey. We describe and characterized four main geomorphological units, 20 subunits, 65 hummocks, and the general drainage network. This map is a valuable tool to identify and quantify risks from mass movement processes.

Keywords: debris avalanches, drones, hummocks, El Estribo volcanic complex, Michoacán–Guanajuato volcanic field, Trans-Mexican Volcanic Belt.

1.- Introduction

Geomorphological maps are basic inputs for understanding the terrain and represent the starting point for implementing actions with the purpose of specific applications as for the assessment of landslide hazard and risk from mass movement processes. (Echeverría Arnedo, 1997; Devoto *et al.*, 2012; Tripodo *et al.*, 2012; Loibl and Lehmkühl, 2013; Alcalá-Reygosa *et al.*, 2016; Quesada-Román and Zamorano-Orozco, 2018) Our work presents a detailed geomorphological map of the El Estribo volcanic complex (figure 1) –a regionally important tourist destination in an area occupied by over 7,900 inhabitants (INEGI, 2011). This study is part of an ongoing geomorphological inventory to identify hazards related to gravitational movements and to evaluate risks in the area. El Estribo is located at the southern part of the Pátzcuaro Lake, an area covered by circa 45 volcanoes (Osorio-Ocampo *et al.*, 2018). The lake has been the site of lacustrine sedimentation since Miocene (Isradé-Alcántara *et al.*, 2005) with ideal conditions for animals (Robles-Camacho *et al.*, 2010) and human occupation (Osorio-Ocampo *et al.*, 2018). The area has been subjected to tectonism and volcanism in the past that have disrupted the lacustrine sedimentation (Garduño-Monroy *et al.*, 2011). Past earthquakes have triggered landslides into the Pátzcuaro lake as those recorded for the El Metate and Isla de Janitzio volcanoes (Garduño-Monroy *et al.*, 2011) and El Estribo volcano (Pola, Macías, Garduño-Monroy, *et al.*, 2014). These landslides into the lake surely caused tsunamis in the lake of unknown dimensions. The region has been the site of historic earthquakes occurring in 1845 and 1858 (Isradé-Alcántara *et al.*, 2005). The Pátzcuaro lake and the town of the same name are the number two touristic location within the State of Michoacán, visited by more than 100,000 tourists a year (Bocco *et al.*, 1999). Therefore, there is an urgent need to produce a detailed geomorphological map of the El Estribo Volcanic Complex and its outcrops of debris avalanche deposits exposed on the southern shore of the lake. This map will be very useful for local authorities because it could motivate the generation of landslide susceptibility and hazard maps, which are crucial for and use planning.

2. Geographic, geological and tectonic contexts

The El Estribo mountain is located within the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB), an active continental volcanic arc that runs across central Mexico (figure 3a). The TMVB has a length of over 1,000 km extending from the states of Nayarit in the Pacific coast to Veracruz in the Gulf of Mexico (Demant, 1979). It consists of large stratovolcanoes, calderas and monogenetic volcanoes concentrated in certain zones in which coexist in time and space called “volcanic fields” (Macías, 2005). The Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (MGVF) is located in the central western part of the TMVB (Hasenaka and Carmichael, 1985) and it includes nearly 900 cinder cones, 100 small structures (cones, domes, thick lava flows, etc.), and over 300 medium size volcanoes, but it lacks active volcanoes (Hasenaka, 1994; Hasenaka *et al.*, 1994) (figure 3b). Several volcanoes with partial collapse of their flanks occur within the TMVB (Capra *et al.*, 2002), one of which is the Late Pleistocene El Estribo volcanic structure located south of Pátzcuaro Lake (Pola *et al.*, 2014a; figure 3c). El Estribo is made up of a basal shield volcano that is crowned by a cinder cone separated by a paleosol dated at $28,360 \pm 170$ ybp. The shield volcano is cut by an E-W normal fault exposing its basal diameter and 200 m of piled lava flows, while the cinder cone above is not affected by the fault (figure 1). This fault scarp is associated to a basal and an upper debris avalanche deposits of different age and an exposed hummocky topography to the north of the volcanic structure and along the southern shore of the Pátzcuaro Lake as presented in figure 5 (Pola *et al.*, 2014a; Pola *et al.*, 2015).



Figure 1: a) Perspective view from the eastern scarp of El Estribo. The Pátzcuaro Lake and the island of Janitzio (scoria cone) appear in the background to the right. b) View from the south of the El Estribo cinder cone (photographs of Gemma Gómez-Castillo).

The study area is located in the municipality of Pátzcuaro in the State of Michoacán, it encompasses an area of 35.4 km² that includes the El Estribo volcanic complex (figure 3c) and small parts of city of Pátzcuaro, and the Pátzcuaro Lake. The average annual rainfall in the area is 943 mm (figure 2a) and the rainiest month is July (figure 2b) (CONAGUA, 2017).

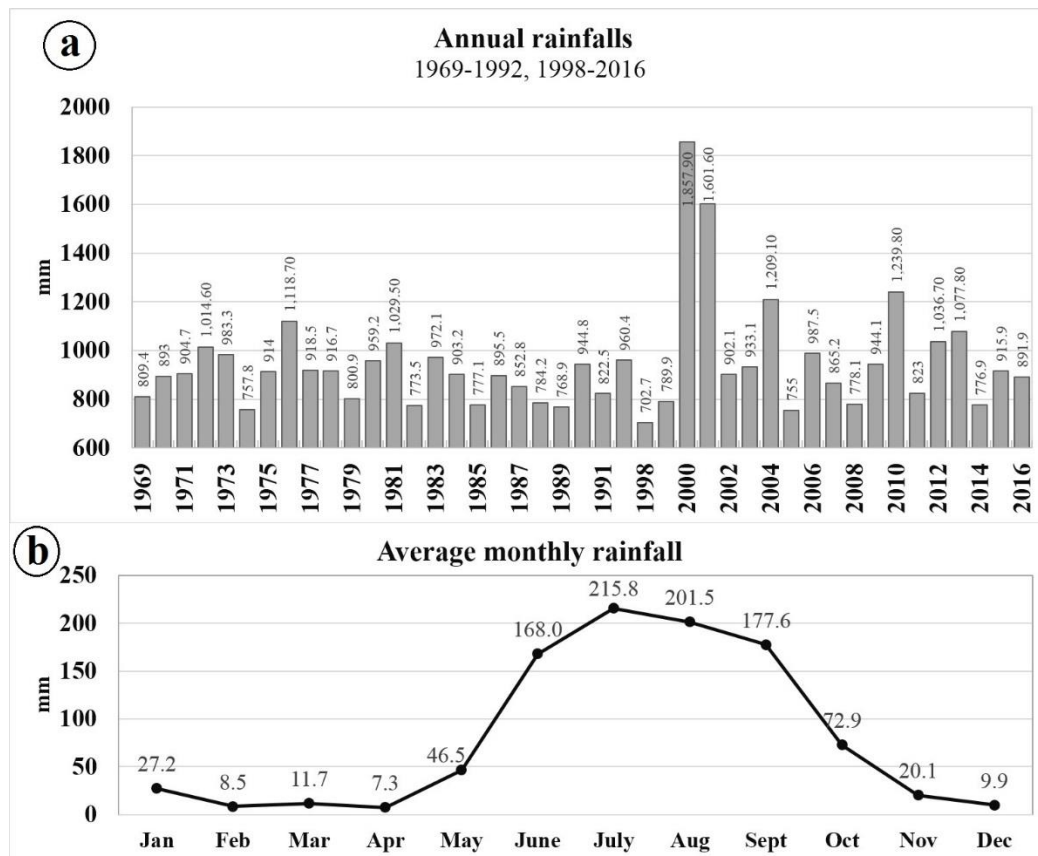


Figure 2: Graphs showing the rainfall variables of the study area during a period of 43 years between 1969 and 2016. a) Annual rainfall. b) Average monthly rainfall. Data from CONAGUA, 2017, weather station 16087 “Pátzcuaro”, located at 19.516389° latitude, -101.609722° longitude.

The central part of the TMVB is disrupted by the Morelia-Acambay Fault System (MAFS) that has a predominantly extensional regime with E-W normal faults and NNW-SSE directions (Pasquarè *et al.*, 1991; Suter *et al.*, 1992; Isradé-Alcántara *et al.*, 2005; Garduño-Monroy *et al.*, 2009b; Ferrari *et al.*, 2012). In the Pátzcuaro area MAFS is represented by the E-W Jarácuaro and Pátzcuaro faults that form a semi-graben with a N-S extension regime (Osorio-Ocampo *et al.*, 2018; Pola, Macías, Osorio-Ocampo, *et al.*, 2014). Paleoseismological studies in the area suggest that severe earthquakes have hit the area during Holocene (Isradé-Alcántara *et al.*, 2005).

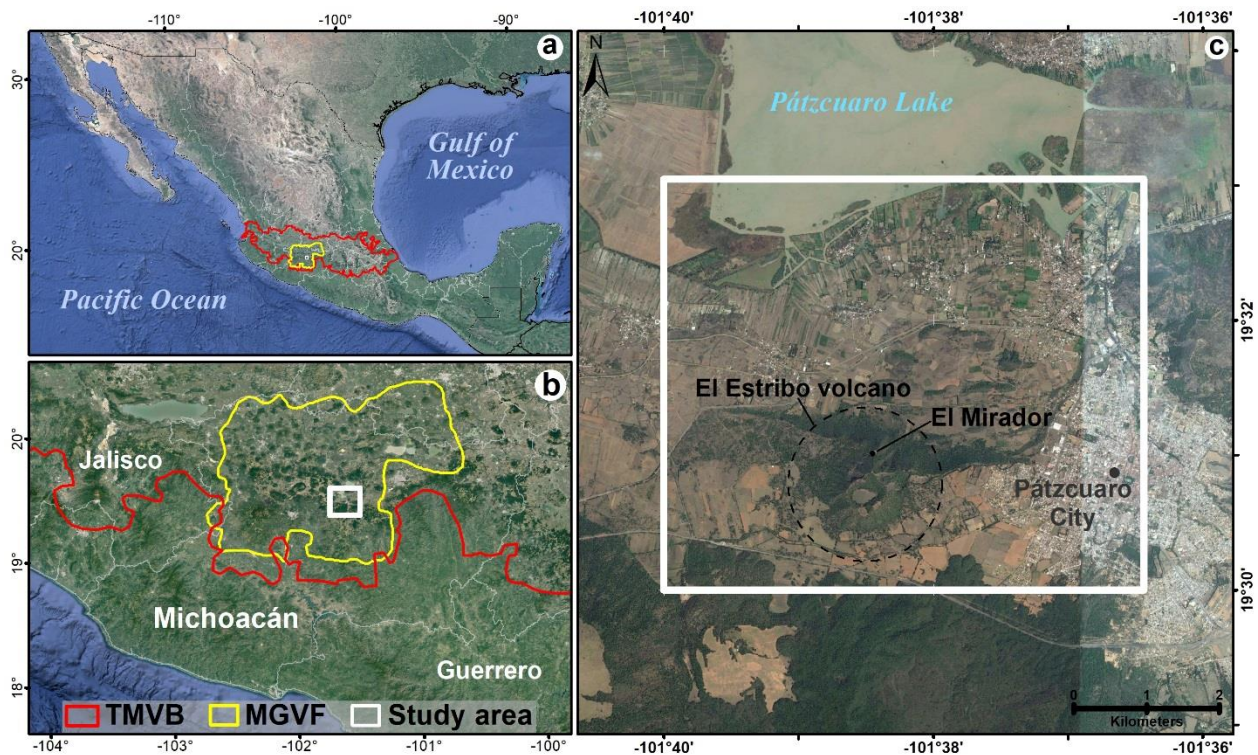


Figure 3: a) Location of the study area within the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB) and b) the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field (MGVF). c) Location of the study area to the south of Lake Pátzcuaro. The limits of the TMVB were taken from Ferrari *et al.* (2012) and those of the MGVF, from Mazzarini *et al.* (2010). The white thin lines represent state limits.

3. Materials and methods

The geomorphological map at a 1:20,000 scale of the El Estribo volcanic complex was made using the following inputs: 2008 panchromatic SPOT 5 satellite images at a 5 m spatial resolution, a 1:20,000 scale vector digital data (key E14A22D) of Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI), aerial photographs at a 0.1 m spatial resolution obtained with drone flights made between 2015 and 2018, and field inspections in which the distribution of the landforms and the general morphodynamic processes were observed. The approach applied used two hierarchical levels, geomorphological landscapes and landforms (de Boer, 1992; Bocco *et al.*, 1999; Bocco *et al.*, 2001; Zinck, 2016).

The first step was to generate a digital terrain model (DTMs) from 10-m-equidistant contour lines (INEGI, 2011), afterwards, the DTM was used as an input in ArcMap for producing a hillshade model, a hypsometric map, and a slope map. Subsequently, using ArcMap for calculations and measurements, the slope map was reclassified into seven new ranges representing the potential mass movement according to Aceves Quesada *et al.* (2014), which was used to make a zonation of landforms relative to the process of vertical erosion, and a relief energy map based on 0.04 km² quadrants –which expresses the maximum elevation change– use to describe the potential of the denudation and relief evolution processes, and the presence of geological structures

and threats (Lugo-Hubp, 1988; Quesada-Román and Barrantes-Castillo, 2017). These products supported the interpretation of geomorphological landscapes and landforms following the methodology of Ventura *et al.* (2005), Miccadei *et al.* (2012) and Miccadei *et al.* (2013). Hummocks were recognized and identified visually over the hillshade model.

A Phantom 3 Standard unmanned aerial vehicle (UAV) was flown at an average height of 120 meters above the ground, shooting 2714 photos on the scarp area (figure 6). Pix4DCapture and MapsMadeEasy applications were used to achieve a homogeneous overlap (80% front, 75% side). Agisoft PhotoScan Professional (2016) was used to process the information, and a high resolution DTM at a 0.1 m spatial resolution was generated from a classified dense cloud.

All this information was verified during field survey for geological and geomorphological studies and to operate drone flights. Two different working scales were used in the interpretation of units and the delimitation of hummocks. In the scarp area, a 1:500 scale was used with a 4 m² minimum mappable unit because of the high resolution of the DTM (10 x 10 cm pixels). For the remaining areas, a 1:5000 scale was used with a 400 m² minimum mappable unit. The geological data (ages, lithology, volcanic stratigraphy, etc.) were taken from Pola *et al.* (2014a, 2015) and Osorio-Ocampo *et al.* (2018). Finally, the geomorphological map was designed by correlating the geomorphological structures with the geology and establishing categories and subcategories that were easy to identify and interpret in relatively small areas.

4. Results

The main geomorphic features and characteristics of the El Estribo Volcanic Complex are presented in the geomorphological map, such as the main morphometric information (hypsometry, relief energy, slope), potential mass movement processes and landform distribution. This information is incorporated in six main sections, described in the following paragraphs:

4.1. Hypsometric map

The altimetry analysis of the area identified patterns of the spatial distribution and characteristics of altitudinal contrasts (Quesada-Román and Zamorano-Orozco, 2019). The hypsometric map of figure 4a displays the changes in the elevation of the relief. In this map, the highest point corresponds to the El Estribo cinder cone at 2451 m above sea level (here after all elevations are given in meters above sea level) and the lowest the Pátzcuaro Lake at 2040 m. The largest area includes elevations between 2040 and 2080 m, which represents 54.5% of the study area, and mostly corresponds to the lacustrine plain (figure 4a), followed by elevations between 2080 and 2280 m (42.6 %), morphologically corresponding to gently hillslope, fault scarp, and upper piedmont, and the smaller area corresponds to elevations above 2280 m (2.9 %) coinciding with the cinder cone and some high parts of the lava flows.

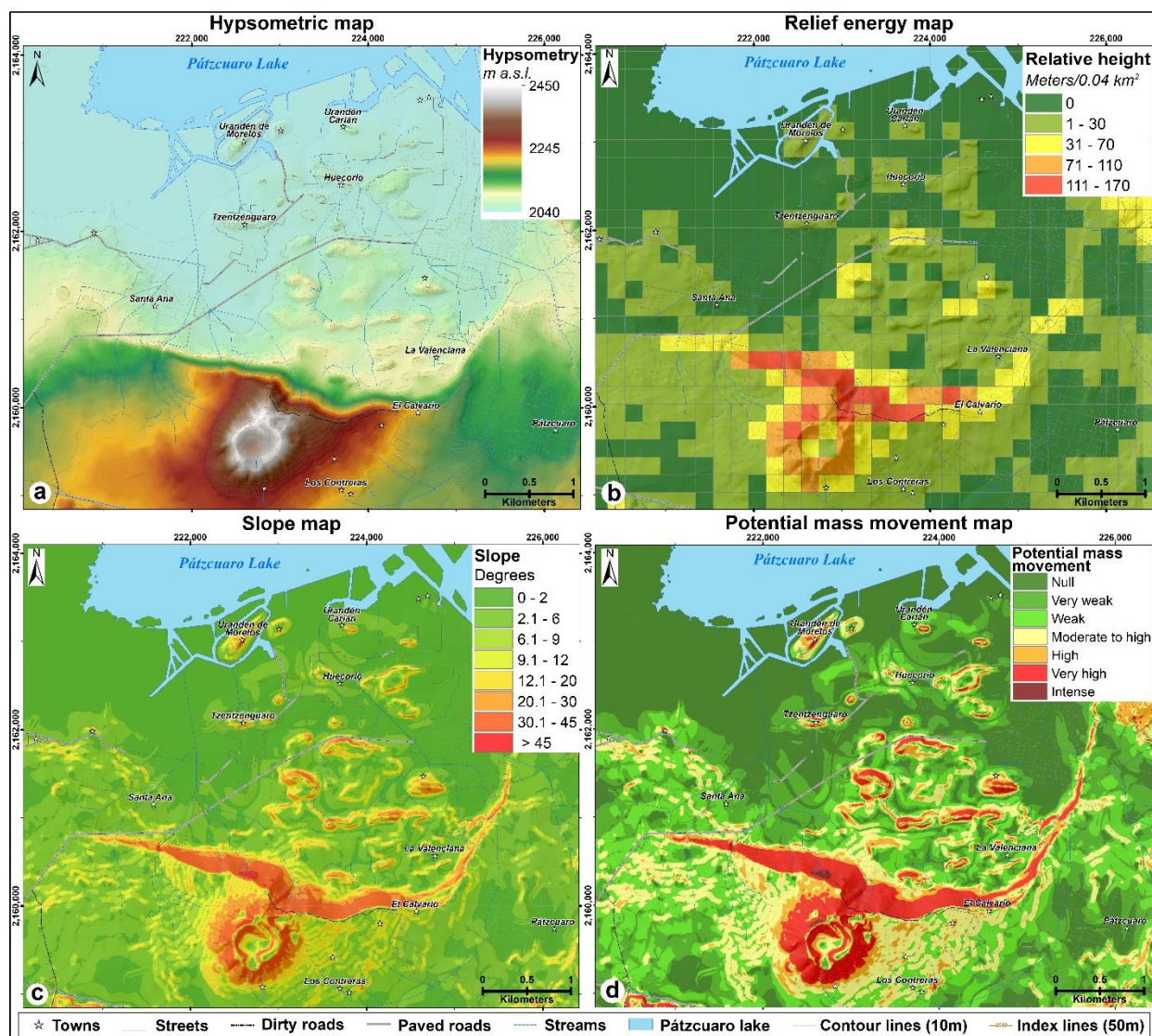


Figure 4: Thematic maps of the study area: a) Hypsometric, represented by stretch values along a color ramp, four standard deviations type, b) Relief energy, grid of 200 x 200 meters, c) Slope and d) Potential mass movement.

4.2. Relief energy map

The relief energy map was obtained by a spatial search of the maximal and minimal elevations every 200 m² followed by the subtraction of the second from the first values, thus finding the maximal difference in elevation within a 200 x 200 m (0.04 km²) grid. A raster map was obtained from the continuous values of the relief energy expressed in m/0.04 km². The map shows that the highest values (of nearly 170 m) are located along the fault scarp and the cinder cone, and the lowest, on the lacustrine plain (figure 4b).

4.3. Slope map

The inclination of the terrain is one of the most important factors of mass movement processes (Guzzetti *et al.*, 2012; Aceves Quesada *et al.*, 2014; Alcalá-Reygosa *et al.*, 2016; Quesada-Román and Zamorano-Orozco, 2018; Shrestha and Poudel, 2018) because water erosion has a higher impact in abrupt slopes, which may lead to the acceleration of the process in such areas. The slope map was obtained in ArcMap by algebraic and trigonometric operations using the contour lines to obtain the degree of inclination of the terrain. The maps show that the predominant slope values on the lacustrine plain vary between 0 and 2°. In the very gentle hillsides surrounding the plains, a value between 2.1 and 6° is dominant. In the upper foothills and gentle slopes that value ranges between 6 a 20° and in some mountainsides and the fault scarp inclinations this figure is above 30°. Finally, in parts of the cinder cone the slopes range between 20 and 45°, higher values being only present in the walls of formerly exploited sand and gravel pits (figure 4c).

4.4. Potential mass movement map

The potential mass movement map is aimed to zoning the landforms in relation with gravitational processes (van Beek *et al.*, 2008; Shroder Jr., *et al.*, 2011; Aceves Quesada *et al.*, 2013; Aceves Quesada *et al.*, 2014). This map reclassify the slope map into the following seven ranks according to Aceves Quesada *et al.* (2014): Null movement, from 0 to 1.5°; very weak movement, from 1.5 to 3°; weak movement, from 3 to 6°; moderate to high movement, from 6 to 12°; high movement, from 12 to 20°; very high movement from 20 to 45°; and intense movement in inclinations above 45°. Most of the lacustrine plain shows null to very weak potential mass movement values while in the fault scarp the potential mass movements are very high and, in some areas, intense (figure 4d).

4.5 Distribution and characteristics of hummocks

The volume (measured in relation to the nearest contour line), convex summit area, and length and orientation of major axes were estimated for the 66 hummocks identified in the debris avalanche area. In both debris avalanches, the present volume of hummocks is approximately 184 million cubic meters. Assuming that the original hillside was placed about 300 m to the north of its present location (Pola *et al.*, 2014a) and reconstructing the scarp contour line, also called morphoisohips (Lugo-Hubp, 1988; Siebe *et al.*, 1992), we estimated that the volume of the collapsed material was 228 million cubic meters. The purple dashed lines in figure 5 show the limits of the basal and upper debris avalanches. Most of the hummocks of both avalanches have an elongated form and only a few are conical. Figure 5 also shows some trends in the distribution patterns, for example, the largest hummocks originated from the older (basal) and more extensive debris avalanche deposit – mostly with ample and flattened summits product of their greater age and more prolonged erosion – tend to be distributed towards the outside of the deposit and have a predominantly NE-SW orientation. Instead, the medium and small sized hummocks are distributed in the center of the deposit and their long axes are variably oriented from east to west. In the case of the younger

(upper) debris avalanche deposit, hummocks have, in general, sharper, more elongate, and narrow summits than in the older avalanche. These hummocks tend to be of low height and small volume in the proximity to the fault scarp, their height and volume increase with distance from the source of the debris up to hummock 43. The orientation of their major axis varies widely in an E-W direction. Table 1 summarizes the values of each hummock's morphological characteristics.

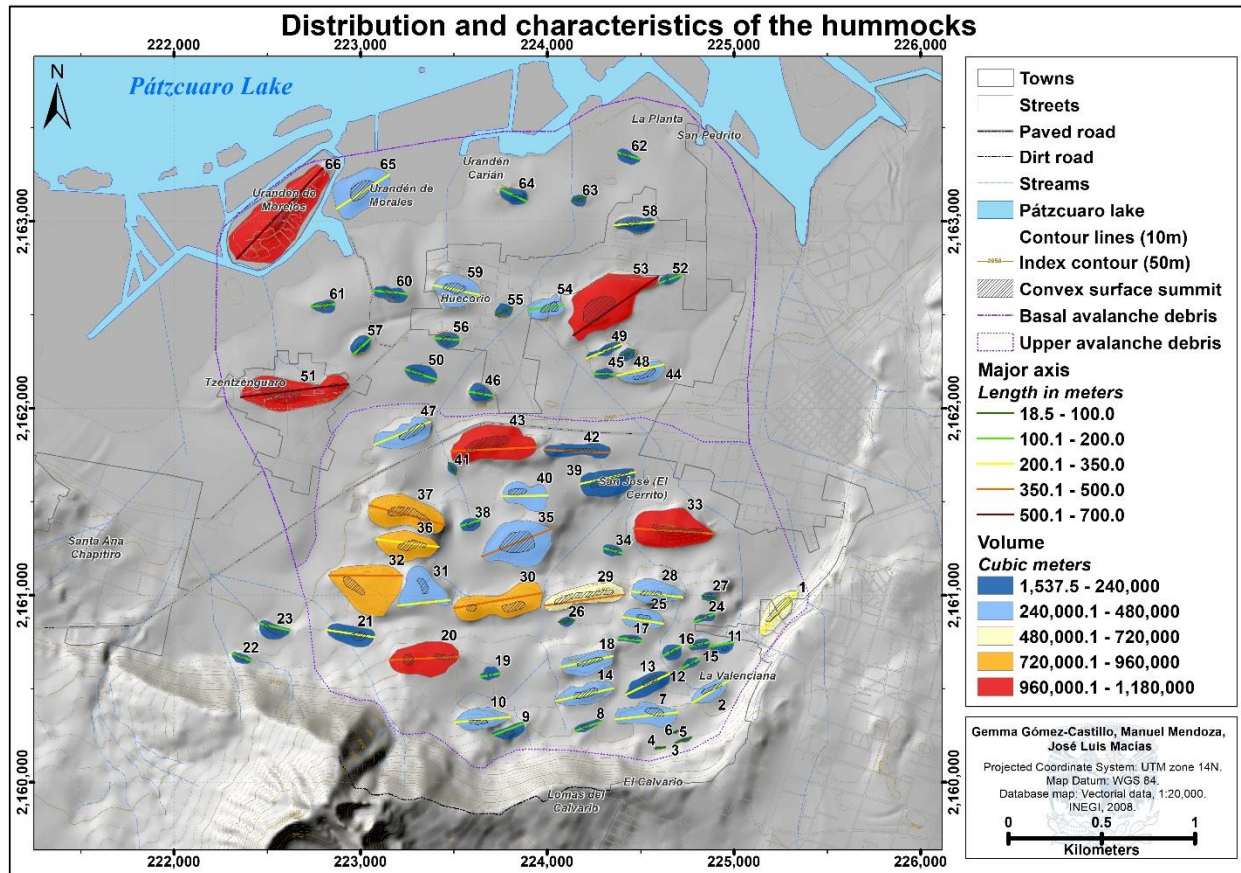


Figure 5: Location, distribution, volume, and length of major axis of hummocks in the study area. The numbers next to the hummocks correspond to their identifiers (Id) in table 1.

Id	Area (m²)	Perimeter (m)	Height (masl)	Volume (m³)	Superficial area (m²)	Length (major axis m)	Strike (°)	Id	Area (m²)	Perimeter (m)	Height (masl)	Volume (m³)	Superficial area (m²)	Length (major axis m)	Strike (°)
1	26,307.2	685.7	2060	561,247.5	27,413.2	296.7	40.4	34	5,046.6	273.6	2050	50,465.6	5,046.6	107.6	104.4
2	15,315.0	516.8	2080	250,471.3	15,592.1	224.7	58.3	35	70,223.5	1030.0	2070	373,818.1	64,570.6	403.6	68.4
3	1,411.4	197.2	2100	14,643.6	1,417.8	89.7	69.9	36	38,819.8	793.2	2060	817,708.2	40,075.2	334.4	97.0
4	604.1	121.7	2100	5,977.2	604.2	54.0	83.2	37	58,623.8	1019.0	2070	861,638.7	55,425.6	416.0	104.4
5	160.0	48.3	2100	1,537.5	160.1	18.5	93.1	38	6,030.0	291.8	2060	56,024.7	6,045.5	110.9	73.5
6	269.5	66.0	2100	2,682.5	269.5	22.8	64.0	39	36,160.8	760.2	2060	239,232.6	30,384.9	301.3	78.0
7	31,340.0	806.4	2090	433,242.7	31,537.3	337.7	83.5	40	27,482.6	673.6	2060	264,782.5	27,527.4	242.9	88.7
8	5,191.1	337.1	2090	53,317.6	5,195.5	150.0	71.0	41	2,543.3	186.9	2050	25,195.7	2,543.3	72.4	147.7
9	9,812.0	430.4	2100	128,451.4	9,930.3	181.9	69.3	42	22,511.5	793.7	2060	133,726.5	15,556.8	357.2	92.3
10	24,000.2	668.5	2100	375,874.5	22,844.5	292.7	84.6	43	70,783.8	1121.3	2060	1,138,125.3	72,237.0	460.2	87.5
11	5,483.7	321.3	2080	8,839.3	5,413.6	129.4	79.0	44	16,362.7	623.4	2040	259,626.6	16,809.2	255.1	76.5
12	3,981.3	265.4	2080	40,796.1	3,986.6	114.8	61.6	45	4,907.6	274.8	2040	56,469.1	4,923.2	107.3	91.2
13	21,650.0	606.1	2090	179,566.8	21,759.3	257.5	64.5	46	9,198.7	356.8	2040	150,656.3	9,468.4	133.0	100.0
14	26,891.5	726.8	2090	306,579.9	27,818.2	312.2	77.5	47	31,785.0	787.8	2050	302,962.3	32,398.9	322.8	67.8
15	5,265.5	284.9	2080	42,677.1	5,351.8	114.2	76.7	48	4,411.7	245.9	2040	83,368.9	4,464.6	90.4	59.3
16	7,370.4	311.4	2080	112,660.5	7,590.2	109.3	61.8	49	7,632.6	455.6	2040	120,810.0	7,741.2	203.9	67.9
17	4,268.7	303.6	2080	42,701.6	4,269.7	133.1	96.4	50	13,217.9	445.8	2040	132,179.5	13,217.9	180.7	108.4
18	27,456.7	685.8	2090	259,804.8	27,559.1	283.2	78.3	51	77,749.1	1328.8	2040	1,054,438.7	79,079.9	580.9	83.0
19	5,488.9	290.2	2080	57,180.3	5,491.6	111.1	80.4	52	4,952.1	298.2	2040	48,306.7	4,952.1	125.5	69.9
20	52,799.4	913.9	2080	1,115,578.5	53,698.7	376.4	87.2	53	94,761.4	1372.5	2050	1,179,204.6	95,874.9	550.6	55.4
21	22,280.1	617.0	2060	238,131.8	22,394.3	258.6	98.6	54	17,363.1	529.4	2040	277,623.2	17,618.3	194.2	82.3
22	4,491.5	271.8	2060	46,099.7	4,561.2	114.7	110.5	55	5,620.2	275.4	2040	56,201.7	5,620.2	98.2	66.6
23	11,183.4	428.1	2050	88,739.5	11,294.5	168.2	102.7	56	8,927.0	349.8	2040	89,269.9	8,927.0	132.0	93.9
24	4,035.8	283.3	2070	40,138.6	4,035.8	120.9	68.2	57	8,386.2	338.4	2040	124,095.1	8,770.5	127.0	48.2
25	18,963.0	541.6	2070	366,683.5	19,153.4	222.0	99.3	58	14,730.3	514.2	2040	216,482.4	15,485.2	219.3	85.3
26	3,180.4	209.9	2070	31,934.9	3,180.5	81.8	83.8	59	31,773.3	681.6	2040	473,373.0	32,215.3	250.1	101.9
27	2,922.7	204.6	2070	25,701.9	2,946.7	72.7	105.2	60	12,112.9	461.1	2040	119,144.0	12,114.2	187.7	95.7
28	26,613.5	663.2	2070	385,144.6	27,098.6	277.0	96.6	61	6,879.6	330.8	2040	67,692.2	6,881.9	130.3	84.2
29	38,009.1	974.3	2070	644,855.0	40,666.9	434.8	82.2	62	6,750.0	325.1	2040	6,192.4	6,750.4	131.3	286.7
30	59,915.8	1158.9	2070	854,743.2	62,725.1	480.6	80.3	63	3,949.4	229.7	2040	37,997.1	3,952.6	81.8	73.6
31	38,643.8	818.8	2070	380,830.5	38,739.0	275.7	84.2	64	10,375.0	396.2	2040	150,701.5	10,893.9	158.4	294.5
32	75,788.3	1064.5	2060	945,978.5	71,307.0	393.7	90.4	65	57,794.6	917.0	2040	268,379.1	58,132.1	335.2	57.1
33	69,004.5	1055.5	2060	1,101,557.8	73,008.9	425.6	93.8	66	135,308.3	1609.1	2040	1,067,843.6	136,610.3	669.2	43.6

Table 1: Morphological characteristics of hummocks. Id: Identifier of hummock. Area (m²): The area in square meters of each hummock calculated in two dimensions. Perimeter (m): Length in meters of the hummocks' contour. Height: The reference contour line value in meters from which the hummocks' volumes were calculated. Volume (m³): The space in cubic meters occupied by each hummock calculated from the next lower contour line (Height). Superficial area (m²): The surface area in square meters of each hummock calculated in three dimensions. Length (major axis m): The length in meters of the major axis of each hummock. Strike (°): Direction or bearing relative to true north in degrees of the major axis of each hummock.

4.6. Geomorphological map

The primary landforms in the study area are the product of volcanic and tectonic activities. The erosion of hillsides and accumulation are the result of the runoff and mass movement exogenous processes. The map characterizes the morphogenic categories in a hierarchical classification (Bocco, *et al.*, 2001; Cisneros-Máximo, 2016; Zinck, 2016), from which the following major units shown in the map were defined: I) Highlands; II) Hills; III) Piedmont, and IV) Plains. These units were further subdivided into 18 relief subunits.

I.- Highlands. It includes 7 subunits distributed in lava flows and the fault scarp (beige and brown colors). The subunits are: 1- Very gently slopes (Lvg), 2- Gently slopes (Lgs), 3- Anthropogenic rubble dumps (Lrd), 4.- Steep slopes (Lss), 5- Lava front (Llf), 6- Hillslope shoulders (Lhs), and 7- Lava flow top (Lft). Subunits 1 to 3 are located near the fault scarp and are mainly made up of andesitic lavas from the shield volcano (Pola *et al.*, 2014a). Subunits 4 to 6 are morphologically compound of the three portions of a lava flow in the eastern area.

II.- Hills. Includes 4 subunits of the El Estribo cinder cone (peach color). The first subunit (Hcb) represents the plain in the bottom of the crater composed of alluvial deposits (material remobilized from the crater walls), pyroclastic surges, ash and lapilli falls, and impacts of basaltic andesite blocks. The second subunit (Hvg) correspond to the very gentle slopes surrounding the crater forming nearly flat surfaces originated by phreatomagmatic explosions that partially collapsed the main crater (Pola *et al.*, 2014a; Pola *et al.*, 2015). These areas are currently planted with maize. The third subunit (His) is the inner slope of the volcanic cone characterized by a slope opposite to the external part of the cone and the same geological composition of the first and second subunits. The fourth subunit (Hos) is the external hillslope of the volcanic cone compound of the pyroclastic fall deposits of ash and dark-gray blocks. The latter deposits are overlaid by remobilized volcanoclastic deposits with sedimentary structures.

III. Piedmont: Made up of 4 subunits distributed in the area of the upper debris avalanche and some areas close to slope changes (pink color). The first subunit (Phu) are the hummocks product of the two debris avalanche deposits geologically integrated of light-gray andesitic angular blocks with jigsaw puzzle structure supported by a fine to coarse ash matrix (Pola *et al.*, 2014a). The second subunit (Pif) is the inter-hummocky plain that geologically belongs to the upper debris avalanche deposit made up of a layer of alluvium and little consolidated lava blocks within a fine to coarse sand matrix (Pola *et al.*, 2014a). The third subunit (Plp) is the lower piedmont located in the lateral gently slopes of the fault scarp. Its geology is diverse and depends on the location. The fourth subunit (Pup) is the upper piedmont to the south of the fault scarp with variable rock compositions.

IV. Plains: It is divided in 3 subunits distributed near the lake and in the southern area of the cinder cone. The first subunit (Plf) is the flood plain adjacent to the water surface. It is composed of fine lacustrine sediments, has very low inclinations. Although it is susceptible to flooding, it has remained dry since 1977, in fact, the lake's level has tended to become lower over time (O'Hara, 1993). The second subunit (Plh) is the currently not flooded lacustrine plain, but that has been intermittently flooded during the nineteenth century (O'Hara, 1993). It is also predominantly composed of lacustrine sediments and, in the basal debris avalanche area, is composed of poorly consolidated grey to reddish massive lava blocks. The third subunit (Pll) corresponds to the inter-lavic plain located to the south between the cinder cone and the lava flows. Geologically, it is made up of three types of rocks, from west to east, the basaltic lavas, the little inclined lava flows from the shield volcano, and the volcanoclastic sediments over which the city of Pátzcuaro is settled.

Besides the above-mentioned subunits, categories were established for a gully (G) and for the formerly operating sand and gravel pits (Op).

The use of drones allowed identifying other smaller previously unrecognized structures (figure 6a). The use of this tools can be of great help if high resolution DTMs are unavailable

(Cook, 2017; Tanteri *et al.*, 2017) but it requires software and hardware to quickly analyze the aerial photographs. Utilization of drones can become a multitemporal analytic tool if it is intended to monitor an area (Hackney and Clayton, 2015; Yu *et al.*, 2017). Its use also eased the identification of human activities and land uses, and the comparison of satellite images from previous years (figure 6b).

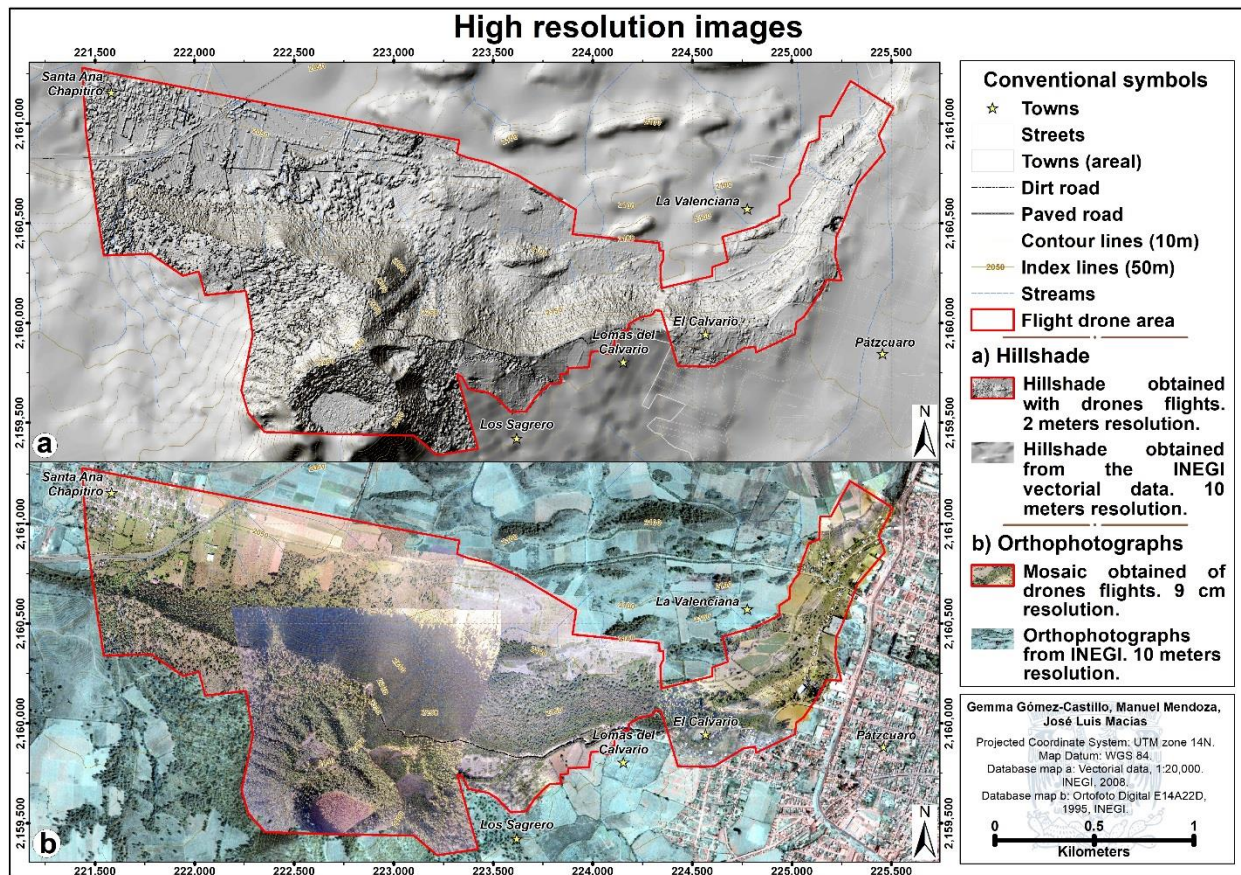


Figure 6: Mosaics of high resolution images obtained from drone flights. The areas outside of the red polygon are references of the contrast in resolution of the information previously available for the study area. a) Hillshade model; and b) Rectified orthophotographs.

5.- Summary and conclusions

Hierarchical geomorphological mapping has been applied to ecological regionalization (Bailey *et al.*, 1985; Bailey, 1987; Avers *et al.*, 1993; Bailey *et al.*, 1994; Klijn and Udo de Haes, 1994; Cleland *et al.*, 1997; Bocco *et al.*, 1999; Fu *et al.*, 2004; Forman, 2014), land use planning (López-Blanco and Villers-Ruiz, 1995; Bocco *et al.*, 2001; Bathrellos *et al.*, 2012), ecological restoration (Kondolf, 1995; Palik *et al.*, 2000), river and hydrological basin management (Frissell *et al.*, 1986; Hawkins *et al.*, 1993; Newson and Newson, 2000; Thomson *et al.*, 2001; Parsons *et al.*, 2003; Lehotský, 2004; Gurnell *et al.*, 2016), and risk analysis (Sinha *et al.*, 2008; Kayastha *et al.*, 2013;

Piacentini *et al.*, 2015; Yu *et al.*, 2017), to mention only some of its applications. In our case the geomorphological map of the El Estribo volcanic complex permitted to analyze a volcanic zone with a very complex tectonic and seismic activity that have triggered two landslides during the last 28,000 ybp (Pola, *et al.*, 2014).

Our methodology and resulting map were useful to analyze with new lights the morphological characteristics of hummocks of both debris avalanche deposits and to differentiate useful features to understand their distribution and link then to their origin. In fact, the orientation of the major axis of the hummocks indicates the direction transversal to the movement of the blocks during the collapse of the rock masses (Ui, 1983; Siebert, 1984; Glicken, 1991). Our map did not detect a unique pattern in the orientation of the major axis of hummocks for neither of the two recorded debris avalanches, superposition of deposits made this task difficult. Authors like Siebe *et al.* (1992), Siebert (1996), and Dufresne and Davies (2009) have explained this phenomenon as a rotation in the horizontal plane taking place as the material is being emplaced. The concentration of bigger hummocks in the far side of the source of the avalanches (Urandén de Morelos Island, Id 66) could be explained by the lack of physical barriers along the path of the avalanche and to the lubricating action of the body of water allowing material to move to a longer distance (Mohrig, 1998; De Blasio *et al.*, 2004; Mazzanti and De Blasio, 2010) and, finally, it could have been to the “bulking” phenomenon, consistent in the incorporation of material at the front of the avalanche as it displaces forward (Siebe *et al.*, 1992; Siebert, 1996; Scott *et al.*, 2001).

Elaborating a detailed geomorphological map eases the understanding of the endogenous and exogenous processes taking place within a specific area; therefore, it is a valuable tool to aid the identification and quantification of the risks from mass movement processes (Bentivenga and Piccarreta, 2016). In addition, the quality of geomorphological maps can be increased by the use of drones to obtain orthophotographs and high resolution DTMs allowing supplementing the information and verifying it in the field (Cook, 2017; Francioni *et al.*, 2018). The methodology we applied in this work provides a quick and effective way to identify the main morphostructural features, which might facilitate its use for land planning and for managing and mitigating risks, minimizing the time and cost needed for that. Our review of the literature showed that our geomorphological map is one of the few to be published on a volcanic structure at such high resolution (10 x 10 cm pixel) of inputs and analysis and we consider it to be an excellent tool to analyze the geomorphological risk, because of which we recommend its application.

Finally, the combination of geomorphology and geology offers a broader perspective of the behavior and functioning of a volcanic area and its associated tectonic processes. Also, taking into consideration that the hierarchical approach we used for the geomorphological mapping can be applied at different scales having the advantage of being replicable in similar areas, even those having a larger surface.

6.- Software (mandatory)

Esri ArcMap 10.4 software was used for georeferencing, digitizing, visualizing orthorectified aerial photographs or remote sensing images, and for spatial or statistical analysis.

7.- Data. The Journal of Maps supports the distribution of original data, in addition to the publication of an article/map. If authors have created new data, that is not under any copyright restrictions, we would welcome the opportunity to distribute it. This section is therefore pertinent to those intending to submit data and should explain the structure of the data, format and any relevant operating instructions.

8.- Acknowledgements.

Thanks are due to CONACyT for the granted PhD scholarship and to the “*Evaluación de la importancia relativa de bosque húmedo de niebla bajo un enfoque de paisaje*” (0179386) project. We thank Antonio Pola, Susana Osorio, Laura García, and Nicolás Vargas for their participation in the field work. Manuel Mendoza acknowledges the sabbatical stay scholarship provided by the PAPIIT_UNAM and Texas A&M University for its partial support. This piece of research is part of the Interinstitutional Lab of Hazard and Risk Evaluation of UNAM.

9.- Map Design (mandatory). Please include at the end of your article a brief paragraph with any design notes that would be useful to the cartographic review editor with respect to understanding your design decisions. This will not form part of the final manuscript and therefore any relevant material should be included in the main body of the text. It is also important to remember that your map should stand independently of the submitted written paper. For example, inset maps included in the paper to orient the map viewer, need also to be included on the map page. Explanatory text with respect to the data classification that is imperative

The portrait layout was chosen because it provided a better adjustment with the map’s legend. Because of the number of present geological and geomorphological features, we decided to separate them to provide a better visualization and to avoid their mixing or confusion. Also due to the latter fact, the legend uses a large space despite the used font is not large.

References

- ACEVES QUESADA, F., MARTÍNEZ LUNA, V. M., LEGORRETA PAULÍN, G. 2013. Gravitational Processes in the Eastern Flank of the Nevado de Toluca México. In: MARGOTTINI, C., CANUTI, P. AND SASSA, K. (eds.). *Landslide Science and Practice, Volume 1: Landslide Inventory and Susceptibility and Hazard Zoning*, 211-219.
- ACEVES QUESADA, F., LEGORRETA PAULÍN, G. & ÁLVAREZ RUÍZ, Y. 2014. Cartografía geomorfológica para el inventario de procesos gravitacionales en la cuenca endorreica del arroyo La Ciénega, flanco oriental del volcán Nevado de Toluca. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66, 329-342.
- ALCALÁ-REYGOSA, J., D., P. & ZAMORANO OROZCO, J. J. 2016. Geomorphology of the Ampato volcanic complex (Southern Peru). *Journal of Maps*, 12, 1160-1169.
- AUTODESK, I. 2016. Agisoft PhotoScan Professional 1.2.6.
- AVERS, P. E., CLELAND, D. T. & MCNAB, H. 1993. National hierarchical framework of ecological units. In: FOLEY, L. H. (ed.) *Silviculture: From the Crane of Forestry to Ecosystem Management. Proceedings of the National Silviculture Workshop*. Hendersonville, N.C.: USDA Forest Service.

- BAILEY, R. G. 1987. Suggested hierarchy of criteria for multi-scale ecosystem mapping. *Landscape and Urban Planning*, 14, 313-319.
- BAILEY, R. G., JENSEN, M. E., CLELAND, D. T. & BOURGERON, P. S. 1994. Design and use of ecological mapping units. In: JENSEN, M. E. & BOURGERON, P. S. (eds.) *Ecosystem management: Principles and applications*. Oregon, U. S.: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. U.S. Department of Agriculture, Northern Region. The Nature Conservancy.
- BAILEY, R. G., ZOLTAI, S. C. & WIKEN, E. B. 1985. Ecological regionalization in Canada and the United States. *Geoforum*, 16, 265-275.
- BATHRELLOS, G. D., GAKI-PAPANASTASSIOU, K., SKILODIMOU, H. D., PAPANASTASSIOU, D. & CHOUSIANITIS, K. G. 2012. Potential suitability for urban planning and industry development using natural hazard maps and geological–geomorphological parameters. *Environmental Earth Sciences*, 66, 537–548.
- BENTIVENGA, M. & PICCARRETA, M. 2016. Geomorphology of Pisticci area (Basilicata, Southern Italy). *Journal of Maps*, 12, 220-226.
- BOCCO, G., MENDOZA, M. E. & VELÁZQUEZ, A. 2001. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping—a tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology*, 39, 211-219.
- BOCCO, G., MENDOZA, M. E., VELÁZQUEZ, A. & TORRES, A. 1999. La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo. *Investigaciones Geográficas*, 40, 7-22.
- CAPRA, L., MACÍAS, J. L., SCOTT, K. M., ABRAMS, M. & GARDUÑO MONROY, V. H. 2002. Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico - behavior, and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 81-110.
- CISNEROS-MÁXIMO, G. 2016. Estudio geológico-geomorfológico de los volcanes Tetillas-Quinceo, Morelia, Michoacán. Propuesta de cartografía jerárquica. Master in Science, Universidad Nacional Autónoma de México.
- CLELAND, D. T., AVERS, P. E., MCNAB, W. H., JENSEN, M. E., BAILEY, R. G., KING, T. & RUSSELL, W. E. 1997. National Hierarchical Framework of Ecological Units. In: BOYCE, M. S. & HANEY, A. (eds.) *Ecosystem Management Applications for Sustainable Forest and Wildlife Resources*. New Haven, CT: Yale University.
- CONAGUA. 2017. Información Estadística Climatológica de la estación 16087 “Pátzcuaro”, serie de datos de 1969 a 2016. Estación localizada en Pátzcuaro, Michoacán, México, en las coordenadas 19.516389° de latitud y -101.609722° de longitud.
- CONNOR, C. B. 1987. Structure of the Michoacan-Guanajuato Volcanic Field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33, 191-200.
- COOK, K. L. 2017. An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology*, 278, 195-208.
- DE BLASIO, F. V., ENGVIK, L., HARBITZ, C. B. & ELVERHØI, A. 2004. Hydroplaning and submarine debris flows. *Journal of Geophysical Research*, 109, 15.
- DE BOER, D. H. 1992. Hierarchies and spatial scale in process geomorphology: a review. *Geomorphology*, 4, 303-318.
- DEMANT, A. 1979. Vulcanología y petrografía del sector occidental del Eje Neovolcánico. *Revista del Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México*, 3, 39-57.
- DEVOTO, S., BIOLCHI, S., BRUSCHI, V. M., FURLANI, S., MANTOVANI, M., PIACENTINI, D., PASUTO, A. & SOLDATI, M. 2012. Geomorphological map of the NW Coast of the Island of Malta (Mediterranean Sea). *Journal of Maps*, 8, 33-40.
- DUFRESNE, A. & DAVIES, T. R. 2009. Longitudinal ridges in mass movement deposits. *Geomorphology*, 105, 171-181.
- ECHEVERRÍA ARNEDEO, M. T. 1997. Cartografía geomorfológica temática y aplicada. In: (ED.), J. L. P. M. (ed.) *Cartografía Geomorfológica Básica y Aplicada*. Logroño: Geoforma Ediciones.

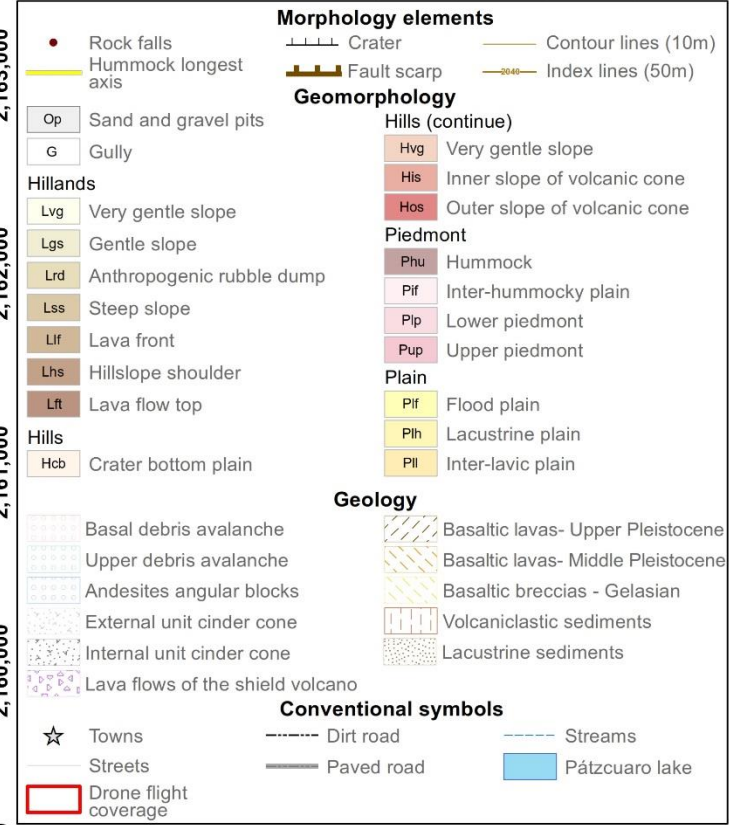
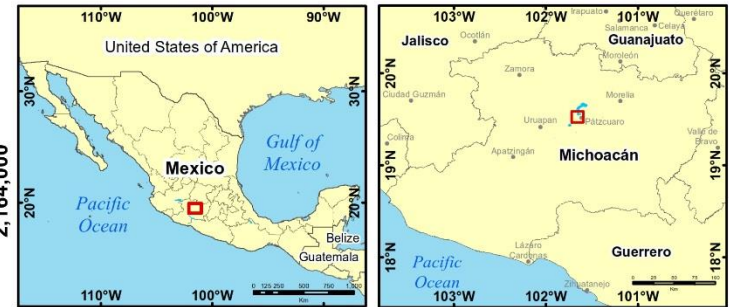
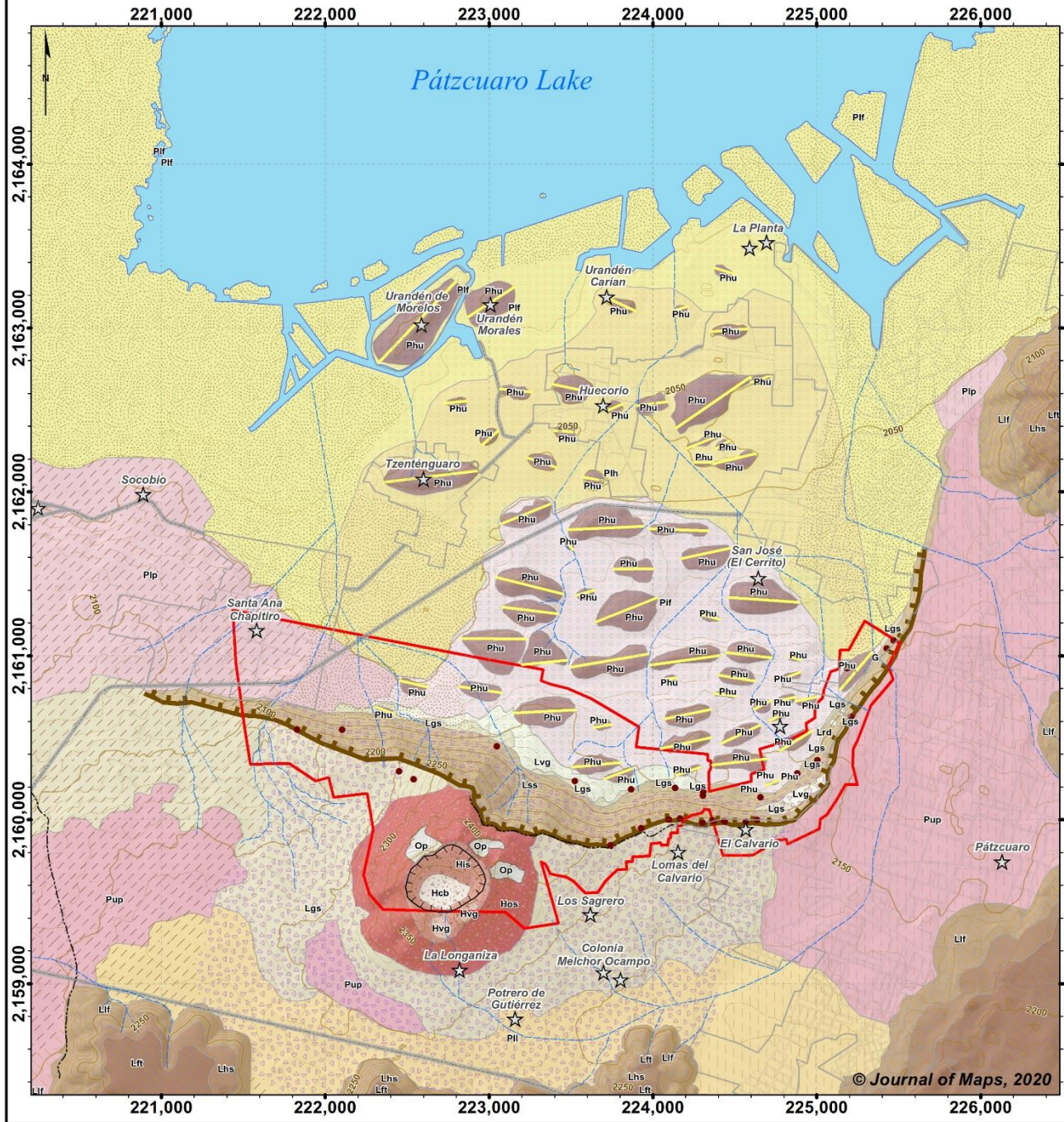
- FERRARI, L., OROZCO-ESQUIVEL, T., MANEA, V. & MANEA, M. 2012. The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523, 122-149.
- FORMAN, R. T. T. 2014. Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions. In: NDUBISI, F. O. (ed.) *The Ecological Design and Planning Reader*. Washington DC Island Press.
- FRANCIONI, M., SALVINI, R., STEAD, D., & COGGAN, J. 2018. Improvements in the integration of remote sensing and rock slope modelling. *Natural Hazards*, 90(2), 975-1004.
- FRISSELL, C. A., LISS, W. J., WARREN, C. E. & HURLEY, M. D. 1986. A hierarchical framework for stream habitat classification: Viewing streams in a watershed context. *Environmental Management*, 10, 199-214.
- FU, B.-J., LIU, G.-H., LÜ, Y.-H., CHEN, L.-D. & MA, K.-M. 2004. Ecoregions and ecosystem management in China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 11, 397-409.
- GARDUÑO-MONROY, V. H., CHÁVEZ-HERNÁNDEZ, J., AGUIRRE-GONZÁLEZ, J., VÁZQUEZ-ROSAS, R., MIJARES ARELLANO, H., ISRADE-ALCÁNTARA, I., HERNÁNDEZ-MADRIGAL, V. M., RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A. & PÉREZ LÓPEZ, R. 2009a. Zonificación de los periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Mich., México, con base en microtemores y estudios de paleosismología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, 623-637.
- GARDUÑO-MONROY, V. H., PÉREZ-LOPEZ, R., ISRADE-ALCANTARA, I., RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A., SZYNKARUK, 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. & MORA CHAPARRO, J. C. 2009b. Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico *Geofísica Internacional*, 48, 319-335.
- GARDUÑO-MONROY, V. H., SORIA-CABALLERO, D. C., ISRADE-ALCÁNTARA, I., HERNÁNDEZ-MADRIGAL, V. M., RODRÍGUEZ-RAMÍREZ, A., OSTROUMOV, M., RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A., CHACON-TORRES, A. & MORA-CHAPARRO, J. C. 2011. Evidence of tsunami events in the paleolimnological record of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México. *Geofísica Internacional*, 50, 147-161.
- GARDUÑO MONROY, V. H. & MACÍAS, J. L. 2010. Peligros volcánicos del Estado de Michoacán. In: Cuadernos de divulgación Científica y Tecnológica del Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología de Michoacán. *Innovación es solución a mi alcance*. Cuaderno 43, serie IV.
- GLICKEN, H. 1991. Sedimentary architecture of large volcanic debris avalanches. In: FISHER, R. V. & SMITH, G. A. (eds.) *Sedimentation in Volcanic Settings*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists.
- GURNELL, A. M., RINALDI, M., BELLETTI, B., BIZZI, S., BLAMAUER, B., BRACA, G., BUIJSE, A. D., BUSSETTINI, M., CAMENEN, B., COMITI, F., DEMARCHI, L., GARCÍA DE JALÓN, D., GONZÁLEZ DEL TÁNAGO, M., GRABOWSKI, R. C., GUNN, I. D. M., HABERSACK, H., HENDRIKS, D., HENSHAW, A. J., KLÖSCH, M., LASTORIA, B., LATAPIE, A., MARCINKOWSKI, P., MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, V., MOSSELMAN, E., MOUNTFORD, J. O., NARDI, L., OKRUSZKO, T., O'HARE, M. T., PALMA, M., PERCOPO, C., SURIAN, N., VAN DE BUND, W., WEISSTEINER, C. & ZILIANI, L. 2016. A multi-scale hierarchical framework for developing understanding of river behaviour to support river management. *Aquatic Sciences*, 78, 1-16.
- GUZZETTI, F., MONDINI, A. C., CARDINALI, M., FIORUCCI, F., SANTANGELO, M., CHANG, K.-T. 2012. Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112 (1-2), 42-66.
- HACKNEY, C. & CLAYTON, A. I. 2015. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and their application in geomorphic mapping. In: COOK, S. J., CLARKE, L. E. & NIELD, J. M. (eds.) *Geomorphological techniques*. London: British Society for Geomorphology.

- HASENAKA, T. 1994. Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, 13-31.
- HASENAKA, T., BAN, M. & DELGADO GRANADOS, H. 1994. Contrasting volcanism in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, central Mexico: Shield volcanoes vs. cinder cones. *Geofísica Internacional*, 33, 125-138.
- HASENAKA, T. & CARMICHAEL, I. S. E. 1985. The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, Central Mexico: Their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 105-124.
- HAWKINS, C. P., KERSHNER, J. L., BISSON, P. A., BRYANT, M. D., DECKER, L. M., GREGORY, S. V., MCCULLOUGH, D. A., OVERTON, C. K., REEVES, G. H., STEEDMAN, R. J. & YOUNG, M. K. 1993. A Hierarchical Approach to Classifying Stream Habitat Features. *Fisheries*, 18, 3-12.
- INEGI 2011. Censo de Población y Vivienda 2010. Resultados definitivos.
- ISRADÉ-ALCÁNTARA, I., GARDUÑO-MONROY, V. H., FISHER, C. T., POLLARD, H. P. & RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A. 2005. Lake level change, climate, and the impact of natural events: the role of seismic and volcanic events in the formation of the Lake Patzcuaro Basin, Michoacan, Mexico. *Quaternary International* 135, 35–46.
- KAYASTHA, P., DHITAL, M. R. & DE SMEDT, F. 2013. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences*, 52, 398-408.
- KLIJN, F. & UDO DE HAES, H. A. 1994. A hierarchical approach to ecosystems and its implications for ecological land classification. *Landscape Ecology*, 9, 89-104.
- KONDOLF, G. M. 1995. Geomorphological stream channel classification in aquatic habitat restoration: Uses and limitations. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 5, 127–141.
- LEHOTSKÝ, M. 2004. River morphology hierarchical classification (RMHC). *Acta Univeristatis Carolinae*, 1, 33-45.
- LOIBL, D. & LEHMKUHL, F. 2013. High-resolution geomorphological map of a low mountain range near Aachen, Germany. *Journal of Maps*, 9, 245-253.
- LÓPEZ-BLANCO, J. & VILLERS-RUIZ, L. 1995. Delineating boundaries of environmental units for land management using a geomorphological approach and GIS: A study in Baja California, Mexico. *Remote Sensing of Environment*, 53, 109-117.
- LUGO-HUBP, J. I. 1988. *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos cartográficos)*, México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México.
- MACÍAS, J. L. 2005. Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen conmemorativo del centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana, tomo LVII, 379-424.
- MAZZANTI, P. & DE BLASIO, F. V. 2010. Peculiar Morphologies of Subaqueous Landslide Deposits and Their Relationship to Flow Dynamics. In: MOSHER, D. C., SHIPP, C., MOSCARDELLI, L., CHAYTOR, J., BAXTER, C., LEE, H. & URGELES, R. (eds.) *Submarine Mass Movements and Their Consequences*.
- 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, 55-64.
- MICCADEI, E., PIACENTINI, T., DAL POZZO, A., LA CORTE, M. & SCIARRA, M. 2013. Morphotectonic map of the Aventino-Lower Sangro valley (Abruzzo, Italy), scale 1:50,000. *Journal of Maps*, 9, 390-409.
- MICCADEI, E., PIACENTINI, T., GERBASI, F. & DAVERIO, F. 2012. Morphotectonic map of the Osesto River basin (Abruzzo, Italy), scale 1:30,000. *Journal of Maps*, 8, 62-73.
- MOHRIG, D., WHIPPLE, K. X., HONDZO, M., ELLIS, C. & PARKER, G. 1998. Hydroplaning of subaqueous debris flows. *Geological Society of America Bulletin*, 110, 387–394.

- NEWSON, M. D. & NEWSON, C. L. 2000. Geomorphology, ecology and river channel habitat: mesoscale approaches to basin-scale challenges. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 24, 195-217.
- O'HARA, S. L. 1993. Historical Evidence of Fluctuations in the Level of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México over the Last 600 Years. *The Geographical Journal*, 159, 51-62.
- OSORIO-OCAMPO, S., MACÍAS, J. L., POLA, A., CARDONA-MELCHOR, S., SOSA-CEBALLOS, G., GARDUÑO-MONROY, V. H., LAYER, P. W., GARCÍA-SÁNCHEZ, L., PERTON, M. & BENOWITZ, J. 2018. The eruptive history of the Pátzcuaro Lake area in the Michoacán Guanajuato Volcanic Field, central México: Field mapping, C-14 and 40Ar/39Ar geochronology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, 307-328.
- PALIK, B. J., GOEBEL, P. C., KIRKMAN, L. K. & WEST, L. 2000. Using landscape hierarchies to guide restoration of disturbed ecosystems. *Ecological Applications*, 10, 189-202.
- PARSONS, M., THOMS, M. C. & NORRIS, R. H. 2003. Scales of Macroinvertebrate Distribution in Relation to the Hierarchical Organization of River Systems. *Journal of the North American Benthological Society*, 22, 105-122.
- PASQUARÈ, G., FERRARI, L., GARDUÑO MONROY, V. H., TIBALDI, A. & VEZZOLI, L. 1991. Geologic Map of the Central Sector of the Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán, Mexico, Geological Society of America. Geological Society of America Map and Chart series, MCH072, 22.
- PIACENTINI, D., DEVOTO, S., MANTOVANI, M., PASUTO, A., PRAMPOLINI, M., & SOLDATI, M. (2015). Landslide susceptibility modeling assisted by Persistent Scatterers Interferometry (PSI): an example from the northwestern coast of Malta. *Natural Hazards*, 78, 681–697.
- POLA, A., MACÍAS, J. L., GARDUÑO-MONROY, V. H., OSORIO-OCAMPO, S. & CARDONA-MELCHOR, S. 2014a. Successive collapses of the El Estribo volcanic complex in the Pátzcuaro Lake, Michoacán, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289, 41–50.
- POLA, A., MACÍAS, J. L., OSORIO-OCAMPO, S., GARDUÑO-MONROY, V. H., MELCHOR, S. & MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, J. 2014b. Geological Setting, Volcanic Stratigraphy, and Flank Failure of the El Estribo Volcano, Pátzcuaro (Michoacán, Mexico). In: . (eds) . . In: ROCHA, R., PAIS, J., KULLBERG, J. & FINNEY, S. (eds.) STRATI 2013. Switzerland: Springer Geology.
- POLA, A., MACÍAS, J. L., OSORIO-OCAMPO, S., SOSA-CEBALLOS, G., GARDUÑO-MONROY, V. H. & 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.
- QUESADA-ROMÁN, A. & BARRANTES-CASTILLO, G. 2017. Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera. *Investigaciones Geográficas*, 94, 1-12.
- QUESADA-ROMÁN, A. & ZAMORANO-OROZCO, J. J. 2018. Geomorphology of the Upper General River Basin, Costa Rica. *Journal of Maps*, 14, 8.
- QUESADA-ROMÁN, A. & ZAMORANO-OROZCO, J. J. 2019. Zonificación de procesos de ladera e inundaciones a partir de un análisis morfométrico en la cuenca alta del río General, Costa Rica. *Investigaciones Geográficas*, 99, 1-19.
- ROBLES-CAMACHO, J., CORONA-CHÁVEZ, P., GUZMÁN, A. F., POLACO, Ó. J., DOMÍNGUEZ-VÁZQUEZ, G., ISRADE-ALCÁNTARA, I. & OLIVEROS-MORALES, A. 2010. Estratigrafía y paleoambiente asociados a un Gomphoteriidae (Cuvieronius hyodon) en Tzintzuntzan, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27, 530-544.
- SCOTT, K. M., MACIAS, J. L., NARANJO, J. A., RODRIGUEZ, S. & MCGEEHIN, J. P. 2001. Catastrophic debris flows transformed from landslides in volcanic terrains: mobility, hazard assessment and mitigation strategies. Professional Paper United States Department of Interior. United States Geological Survey.
- SHRESTHA H. L. & POUDEL M. 2018. Landslide susceptibility zonation mapping in Post-Earthquake scenario in Gorkha District. *Forestry: Journal of Institute of Forestry, Nepal*. 15, 45-56.

- SHRODER JR, J. F., OWEN, L. A., BAE SEONG, Y., BISHOP, M. P., BUSH, A., CAFFEE, M. W., COPLAND, L., FINKEL, R. C. & KAMP, U. 2011. The role of mass movements on landscape evolution in the Central Karakoram: Discussion and speculation. *Quaternary International*, 236, 34-47.
- SIEBE, C., KOMOROWSKI, J.-C. & SHERIDAN, M. F. 1992. Morphology and emplacement of an unusual debris-avalanche deposit at Jocotitlán volcano, Central Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 54, 573-589.
- SIEBERT, L. 1984. Large volcanic debris avalanches: Characteristics of source areas, deposits, and associated eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 22, 163-197.
- SIEBERT, L. 1996. Hazards of Large Volcanic Debris Avalanches and Associated Eruptive Phenomena. In: SCARPA, R. & TILLING, R. (eds.) *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- SINHA, R., BAPALU, G. V., SINGH, L. K. & RATH, B. 2008. Flood risk analysis in the Kosi river basin, north Bihar using multi-parametric approach of Analytical Hierarchy Process (AHP). *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 36, 335-349.
- SUTER, M., QUINTERO, O. & JOHNSON, C. A. 1992. Active faults and state of stress in the central part of the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico 1. The Venta del Bravo Fault. *Journal of Geophysical Research*, 97, 11983-11994.
- TANTERI, L., ROSSI, G., TOFANI, V., VANNOCCI, P., MORETTI, S. & CASAGLI, N. 2017. Multitemporal UAV Survey for Mass Movement Detection and Monitoring. In: MIKOS, M., TIWARI, B., YIN, Y. & SASSA, K. (eds.) *Advancing Culture of Living with Landslides*. WLF 2017. Ljubljana, Slovenia: Springer, Cham.
- THOMSON, J. R., TAYLOR, M. P., FRYIRS, K. A. & BRIERLEY, G. J. 2001. A geomorphological framework for river characterization and habitat assessment. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 11, 373 – 389.
- TRIPODO, A., CASELLA, A., PINO, P., MANDARANO, M. & RASA, R. 2012. Geomorphological map of the Lipari volcanic island (Aeolian Archipelago – Italy). *Journal of Maps*, 8, 107-112.
- UI, T. 1983. Volcanic dry avalanche deposits — Identification and comparison with nonvolcanic debris stream deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18, 135-150.
- VAN BEEK, R., CAMMERAAT, E., ANDREU, V., MICKOVSKI, S. B. & DORREN, L. 2008. Hillslope Processes: Mass Wasting, Slope stability and erosion. In: NORRIS, J. E., STOKES, A., MICKOVSKI, S. B., CAMMERAAT, E., VAN BEEK, R., NICOLL, B. C. & ACHIM, A. (eds.) *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. Dordrecht, The Netherlands. Springer Science.
- VENTURA, G., VILARDO, G., BRONZINO, G., GABRIELE, G., NAPPI, R. & TERRANOVA, C. 2005. Geomorphological map of the Somma-Vesuvius volcanic complex (Italy). *Journal of Maps*, 1, 30-37.
- YU, M., HUANG, Y., ZHOU, J. & MAO, L. 2017. Modeling of landslide topography based on micro-unmanned aerial vehicle photography and structure-from-motion. *Environmental Earth Sciences*, 76:520, 9.
- ZINCK, J. A. 2016. The Geomorphic Landscape: Criteria for Classifying Geoforms. In: ZINCK, J. A., METTERNICHT, G., BOCCO, G. & DEL VALLE, H. F. (eds.) *Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*. Switzerland: Springer.

Detailed geomorphology of debris avalanches of El Estribo volcanic complex (Central Mexico)



Gemma Gómez-Castillo¹, Manuel E. Mendoza¹, José Luis Macías²
¹Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México. ²Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, Michoacán, México.

Projected Coordinate System: UTM zone 14N. Map Datum: WGS 84
Database map: INEGI, 2008. Vector data, 1:20,000. Units: meters.

1:25,000



CAPÍTULO IV: PELIGROSIDAD POR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

**Tesis:
Análisis del riesgo por procesos de remoción en masa
en ambientes volcánicos: El Estribo, Pátzcuaro,
Michoacán, México**



Capítulo IV. Peligrosidad por procesos de remoción en masa.

IV.1 Resumen

Este capítulo describe los mapas de peligros por procesos de remoción en masa (PRM) que se han elaborado como parte de la evaluación del riesgo en el complejo volcánico del Estribo. Se describen también las implicaciones de la existencia de la falla activa Jarácuaro-Pátzcuaro y su relación con los peligros por los PRM, ya que en la zona se han presentado al menos dos avalanchas de escombros durante el Pleistoceno superior y estos fenómenos podrían volver a ocurrir. Se elaboraron siete simulaciones de avalanchas de escombros con el programa Titan2D y dos perfiles topográficos donde se presentan las alturas de los depósitos producidos por las simulaciones que podrían llegar a afectar la zona de estudio. Los resultados de las simulaciones nos indican que las zonas de mayor peligro son las áreas de colapso y las partes más cercanas al escarpe de falla, las cuales presentarían depósitos de mayor altura. Por lo anterior, se recomienda que se amplíe la extensión del Área Natural Protegida de categoría estatal presente en la zona y su uso sea estrictamente forestal.

IV.2 Introducción

En la evaluación de peligro por procesos de remoción en masa (PRM) en ambientes volcánicos el análisis de la geología juega un papel preponderante, ya que está directamente relacionada con los mecanismos de movimiento, el tipo de roca, presencia de discontinuidades y la morfología de las estructuras volcánicas (Castañeda-Leonides, 2011). En este sentido, el presente capítulo describe las implicaciones de la existencia de una falla activa y su relación con los peligros por los PRM.

En nuestro contexto geológico y tectónico, una falla activa es aquella estructura geológica que cumple con uno o varios de los siguientes requisitos: 1, presenta ruptura en superficie; 2, su tasa de desplazamiento debe ser de aproximadamente 0.001 mm/yr⁻¹; 3, en los últimos 10,000 años debe haber tenido actividad sísmica asociada y; 4, que su orientación vaya de acuerdo con el campo de estrés regional actual (Mendoza-Ponce *et al.*, 2018). Adicionalmente, se considera que es una falla sismogénica si presenta

terremotos mayores a $M_w \geq 5.5$ o si es capaz de causar ruptura cosísmica superior a los 3 km de longitud (Mendoza-Ponce *et al.*, 2018).

La zona de estudio está atravesada por las fallas activas Jarácuaro y Pátzcuaro, que forman el graben Jarácuaro-Pátzcuaro (figura 1). La de mayor cercanía e injerencia es la falla Pátzcuaro, que tiene una orientación E-W con caída hacia el norte y que corta al volcán en escudo El Estribo (Garduño-Monroy *et al.*, 2009b; Garduño-Monroy *et al.*, 2011; Pola *et al.*, 2014a; Mendoza-Ponce *et al.*, 2018; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018). De acuerdo con Mendoza-Ponce *et al.* (2018) esta falla presenta una longitud de 33 km, altura máxima del escarpe de 277 m, tasa de desplazamiento de 2.5 mm/yr^{-1} , magnitud estimada de sus sismos de $M_w 6.86$ y una escala de intensidades (ESI 07) de hasta X.

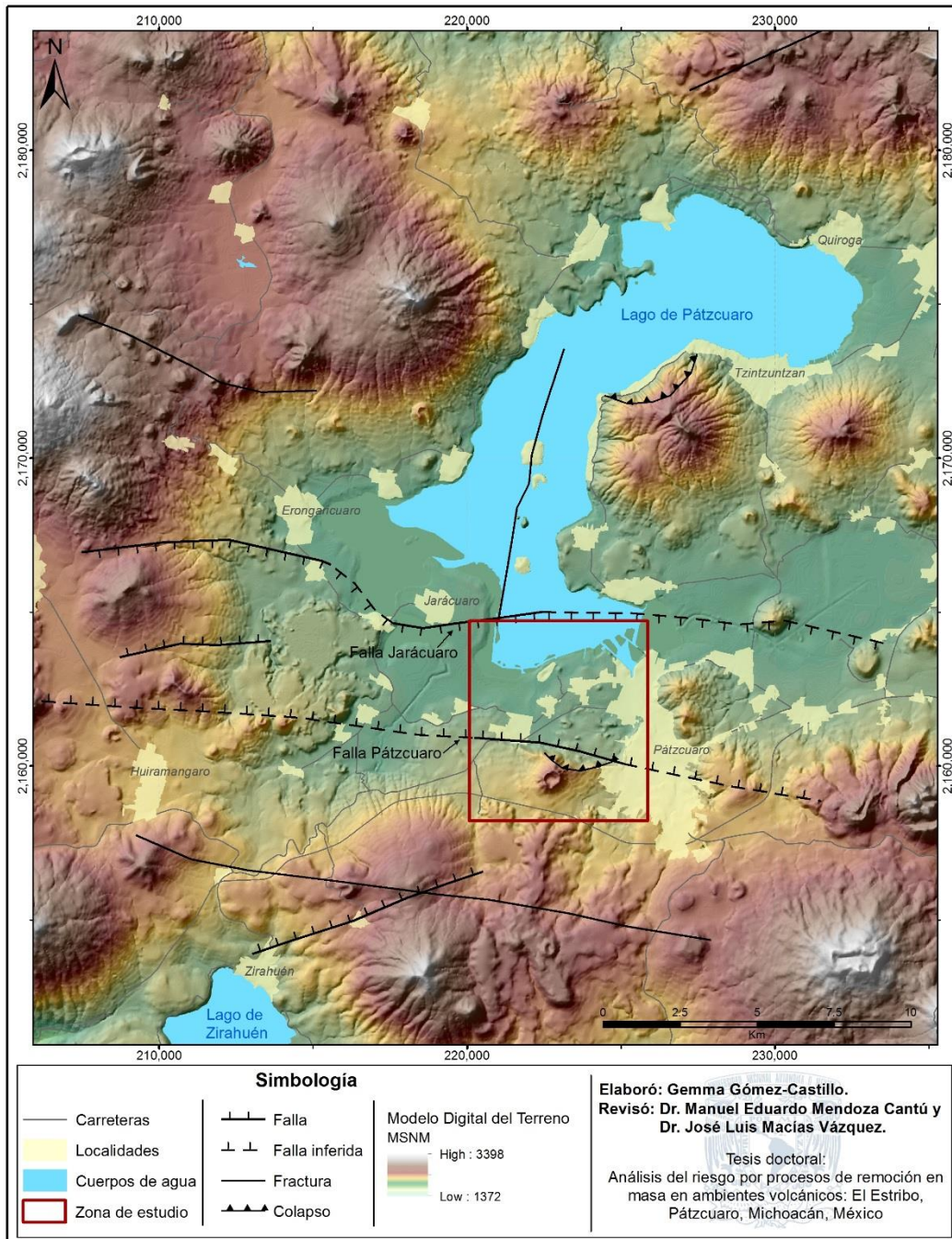


Figura 1: Ubicación de fallas y fracturas cercanas a la zona de estudio, asociadas al sistema de fallas Pátzcuaro – Acambay (Mendoza-Ponce *et al.*, 2018). Estructuras geológicas tomadas de Garduño-Monroy *et al.* (2009a) y conjunto de datos vectoriales geológicos, escala 1:250,000, carta E14-1, producidos por INEGI (1983).

IV.3 Materiales y métodos

Se realizaron varios recorridos de campo en toda el área de estudio, principalmente en el escarpe de la falla “Pátzcuaro” y las zonas aledañas. Se pudieron identificar zonas

con caída de rocas y procesos gravitacionales menores desde la cima, laderas, y piedemonte; adicionalmente, durante los recorridos se colectaron datos sobre cobertura y uso de suelo. Se realizaron vuelos con drones, los cuales permitieron identificar los cambios en la configuración del paisaje asociados a la ocurrencia de PRM, por ejemplo, caída de rocas, desprendimientos o flujos de tierra pequeños. En los lugares donde se encontraron caídas de rocas, se procedió a tomarles medidas a las rocas para obtener sus dimensiones (largo, ancho y alto), con un flexómetro. En las áreas con roca fracturada expuesta se tomaron datos estructurales (fracturamiento preferencial) con una brújula Brunton y se tomó su ubicación precisa con sistema de posicionamiento global (GPS).

El modelamiento del peligro por avalanchas de escombros se realizó con el programa Titan2D (GMFG, 2007), en el cual se realizaron las simulaciones del movimiento de la avalancha, tomando en cuenta su origen en tres puntos distintos del escarpe de falla. Titan2D (2007) es un programa informático desarrollado con el propósito de simular flujos de masas geológicas tales como avalanchas granulares secas, avalanchas de escombros y deslizamientos de tierra sobre modelos de elevación digital del terreno natural. Este código combina simulaciones numéricas de un flujo con datos de elevación digital del terreno soportados en un sistema de información geográfica (SIG), en un sistema operativo de Linux (Canonical-Ltd., 2012).

Los insumos para las simulaciones de avalanchas en Titan2D son el Modelo Digital del Terreno (MDT). Los parámetros utilizados en la modelación son las coordenadas del punto de partida, ángulo de fricción interna, ángulo de fricción basal, tamaño de la pila, dirección del movimiento, máxima distancia, entre otros (figura 2).

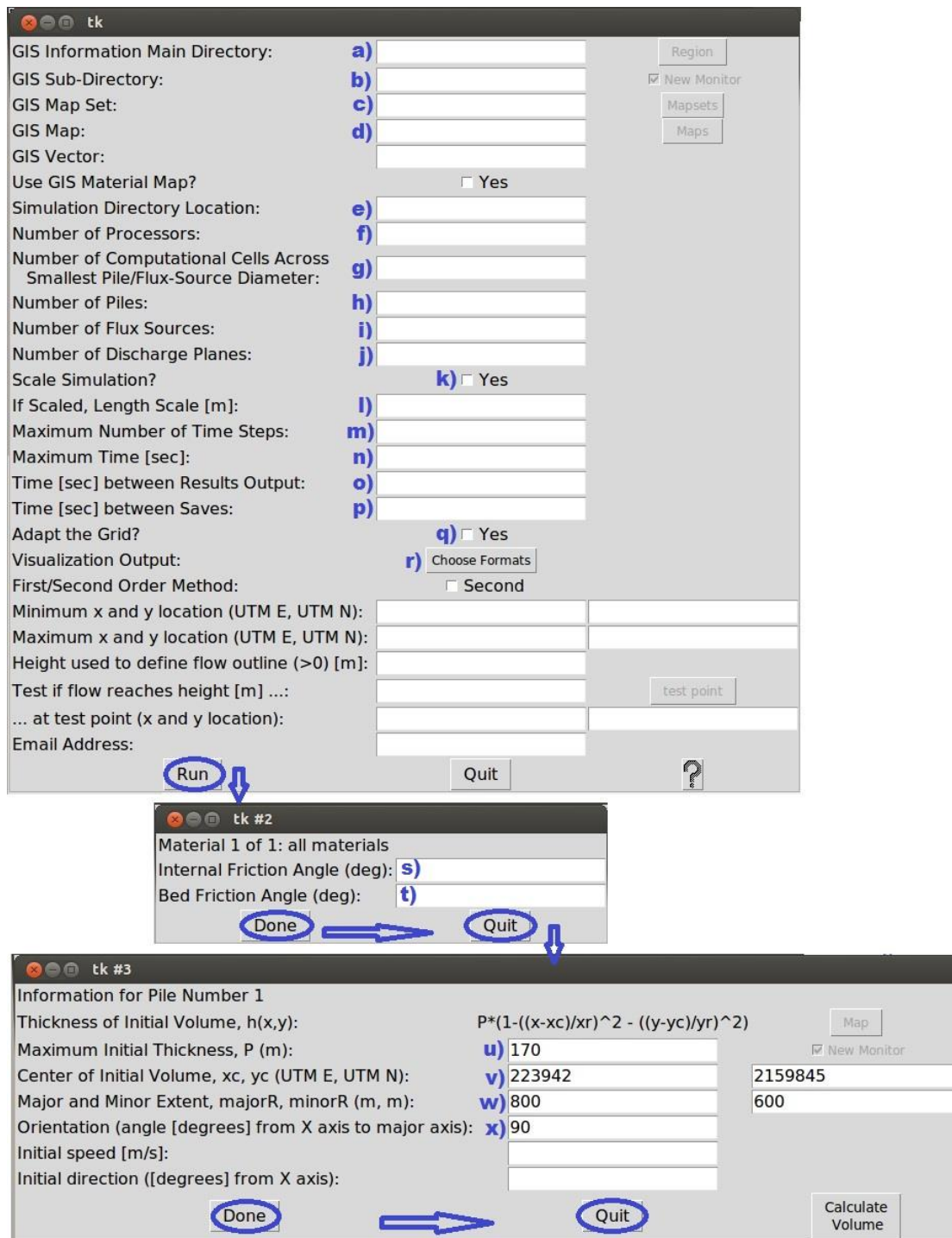


Figura 2: Interfaz gráfica del programa Titan2D, donde se muestran las ventanas usadas para ingresar los parámetros necesarios para las simulaciones.

Los MDT usados se generaron a partir del conjunto de datos vectoriales de la cartografía topográfica escala 1:20 000, clave E14A22D, elaborados por INEGI (2008). Los parámetros de entrada para el programa Titan2D (en la tabla 1 se muestran los datos

usados en la primera simulación) fueron los de la siguiente tabla (el ID corresponde con las letras azules de la figura 2). En total se realizaron 192 simulaciones durante este trabajo.

Id	Descripción	Parámetro usado
A	Entrada sobre los datos del SIG para ser utilizados en la simulación	/home/ubuntu/GEMMA/datos_titan/
B	Entrada sobre los datos del SIG para ser utilizados en la simulación	demtitan/
C	Entrada sobre los datos del SIG para ser utilizados en la simulación	demr/
D	Entrada sobre los datos del SIG para ser utilizados en la simulación	Demr
E	Directorio donde los archivos de salida de datos se almacenarán	rv2_3108
F	Número de procesadores que el usuario decida utilizar	1
G	Nivel máximo de refinamiento en la cuadrilla de celdas	20
H	Número de pilas	1
I	Número de fuentes de material que es extruido activamente desde el suelo	0
J	Número de planos de descarga	0
K	Permite volver adimensionales las ecuaciones que gobiernan la simulación	✓
L	Longitud que se espera recorra el flujo	6000
M	Número máximo de pasos de la simulación	10000
N	Máximo tiempo en segundos de la simulación	1000
O	Frecuencia con la cual se crearán archivos de salida	3
P	Cada cuanto se desea que se guarde la información	3
Q	Reduce el costo computacional mientras mantiene la precisión de la simulación	✓
R	Permite al usuario elegir el formato de los archivos de salida	XDMF
S	Ángulo de fricción interna	31
T	Ángulo de fricción basal	8
U	Altura máxima inicial de la pila	200
V	Coordenadas de la ubicación del punto de partida	223955/2159971
W	Extensión de los ejes mayor y menor de la pila inicial	2000/400
X	Orientación en grados desde eje x al eje mayor	0

Tabla 1: Parámetros de entrada usados en el programa Titan2D para llevar a cabo la primera simulación de una avalancha de escombros.

La primera simulación se llevó a cabo sobre un MDT que correspondió a una reconstrucción del escarpe original (figura 3), y el objetivo fue recrear la primera avalancha, ocurrida hace $28,110 \pm 720$ años B.P. (Pola *et al.*, 2014a), lo que permitió obtener parámetros extrapolables para las simulaciones con el MDT actual. El MDT reconstruido se elaboró a partir de las estimaciones de la diferencia en altura vertical entre el punto de partida y el punto final y sobre la distancia total recorrida (*H/L ratio*) propuestas Pola *et al.* (2014a) para la avalancha basal. Un insumo muy importante para esta simulación fue el volumen inicial, el cual se determinó mediante el cálculo del material depositado en la zona de montículos, basado en los límites de las avalanchas determinados por Pola *et al.* (2014a). Todas las simulaciones realizadas en Titan2D fueron revisadas usando el programa ParaView 5.5 (2017), el cual permite obtener una visualización con movimiento de las avalanchas de escombros. Los insumos principales para las simulaciones en Titan2D son el ángulo de fricción interna y el ángulo de fricción basal, los cuales fueron obtenidos mediante revisión bibliográfica. En el caso del ángulo de fricción interna, se usaron los valores para lavas andesítico basálticas. La mayoría de los autores sugieren valores de 31 a 38° (Barton y Choubey, 1977; Hoek y Bray, 1981; Sosio *et al.*, 2008; Lukić, 2018) y solo un artículo (Hoek *et al.*, 1995) reporta un ángulo de 24° para masas rocosas de muy baja calidad (muy alteradas). Para este trabajo se usó un ángulo de fricción interna de 31°. Por otra parte, para el ángulo de fricción basal o coeficiente de fricción, autores como Sheridan *et al.* (2005), Sosio *et al.* (2008) y Sosio *et al.* (2011) recomiendan calibrar este valor hasta conseguir la distancia y espesor del depósito esperados, en este caso un ángulo de fricción basal de 8° cumplió con estos requisitos.

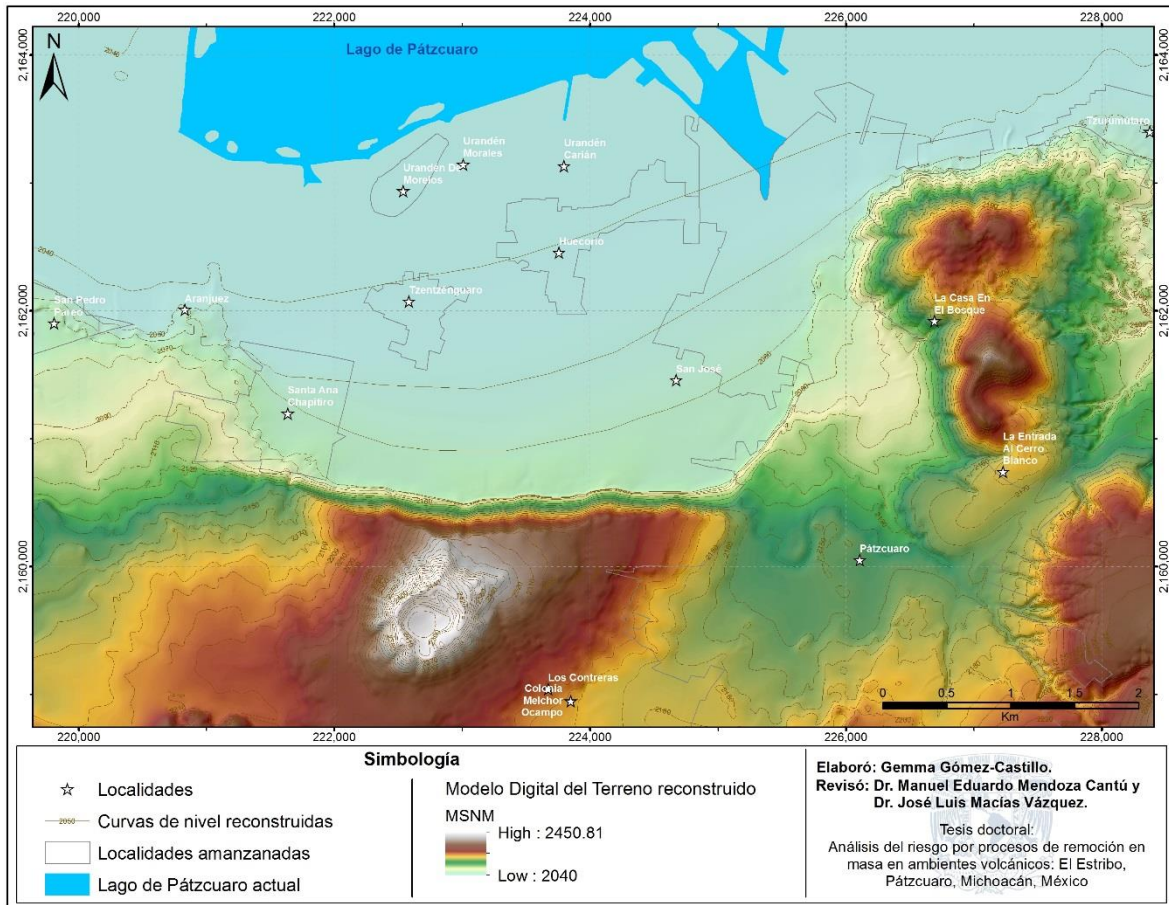


Figura 3: Modelo Digital del Terreno de la topografía aproximada existente hace 28,000 años, antes de la ocurrencia de la primera avalancha de escombros. Se muestran las localidades y la actual línea del lago como referencias.

Posteriormente, con algunos parámetros obtenidos de la primera simulación, como el ángulo de fricción interna, se procedió a efectuar las simulaciones con el MDT actual. Se realizaron varios escenarios con diferentes volúmenes de material removido y diferentes puntos de partida; lo que permitió obtener mapas de peligros para distintos puntos del escarpe, clasificados con base en la altura del depósito final.

IV.4 Resultados

IV.4.1 Determinación de peligro por caída de rocas.

Se lograron identificar varios puntos cercanos al escarpe con caída de rocas, los cuales se muestran en el mapa de la figura 4, adicionalmente, se identificaron y mapearon zonas de fracturas, coladas de lavas, lavas lajeadas, árboles inclinados y afectaciones a construcciones humanas, encontradas en los recorridos de campo.

Las caídas de rocas se ubicaron principalmente en las partes bajas del escarpe y están espaciadas unas con respecto de otras. Los tamaños de las rocas identificadas fueron de bloques mayores al metro y medio de diámetro y la mayoría presentaban bordes angulosos. No se observaron arboles impactados por las rocas, pero esto puede deberse a que esa zona es afectada por quemas y reforestada frecuente. Tampoco se identificaron rocas alejadas de la base del escarpe ni en zonas pobladas.

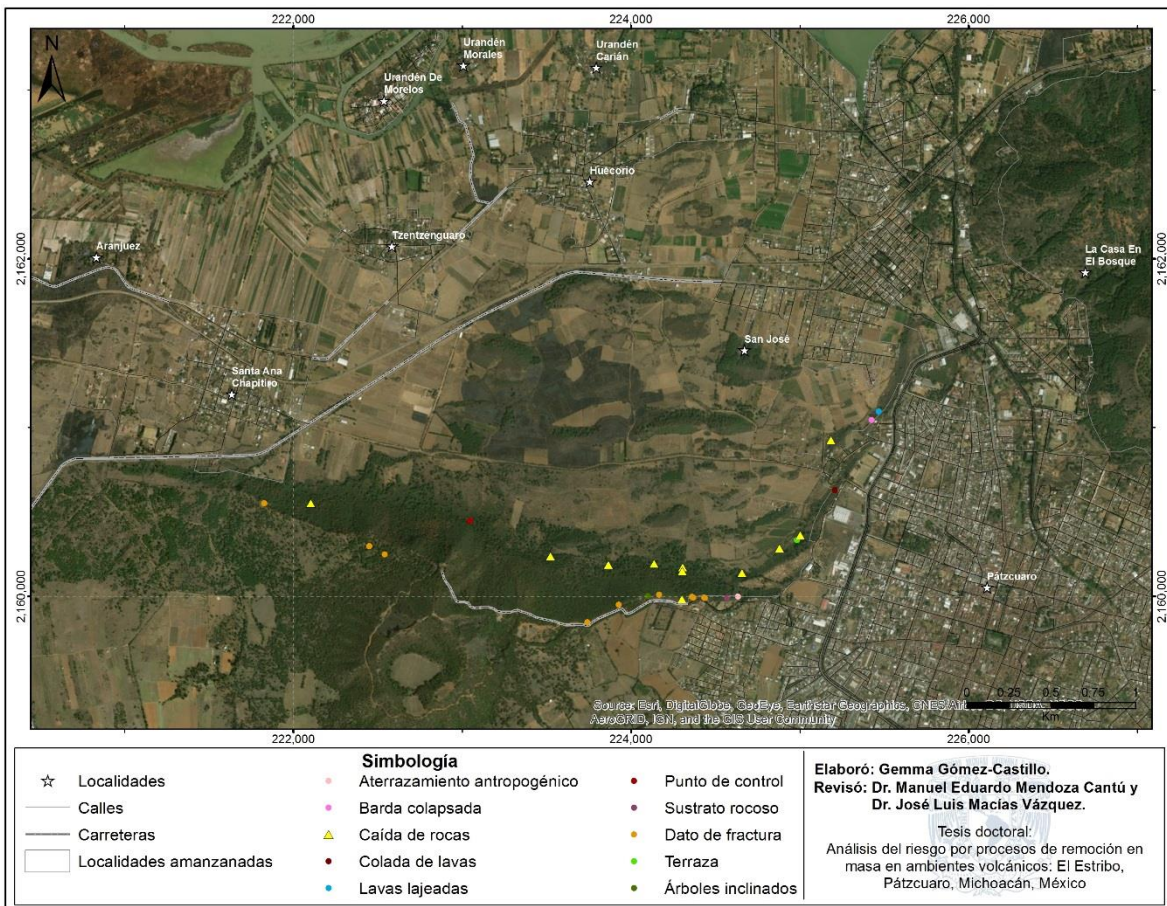


Figura 4: Ubicación de las principales características encontradas en los recorridos de campo. Imagen satelital de fondo: Esri World Imagery.

Los datos estructurales de fracturas tomados con brújula que se obtuvieron en los distintos sitios corresponden a 96 identificaciones de fracturamientos en roca expuesta, de los cuales se muestra su estereograma en la figura 5. A partir de ellos, es posible interpretar la existencia de dos familias de fracturas, la primera de ellas tiene un azimut NNE y una inclinación preferencial de 50°; la segunda familia con un azimut SW y una inclinación preferencial 20°. Lo anterior indica que las fracturas tienden a orientarse en la

dirección del movimiento de las coladas de lava que conforman el escudo basal del volcán Estribo, que de acuerdo con Pola *et al.* (2015), se emplazaron hacia el flanco WSE.

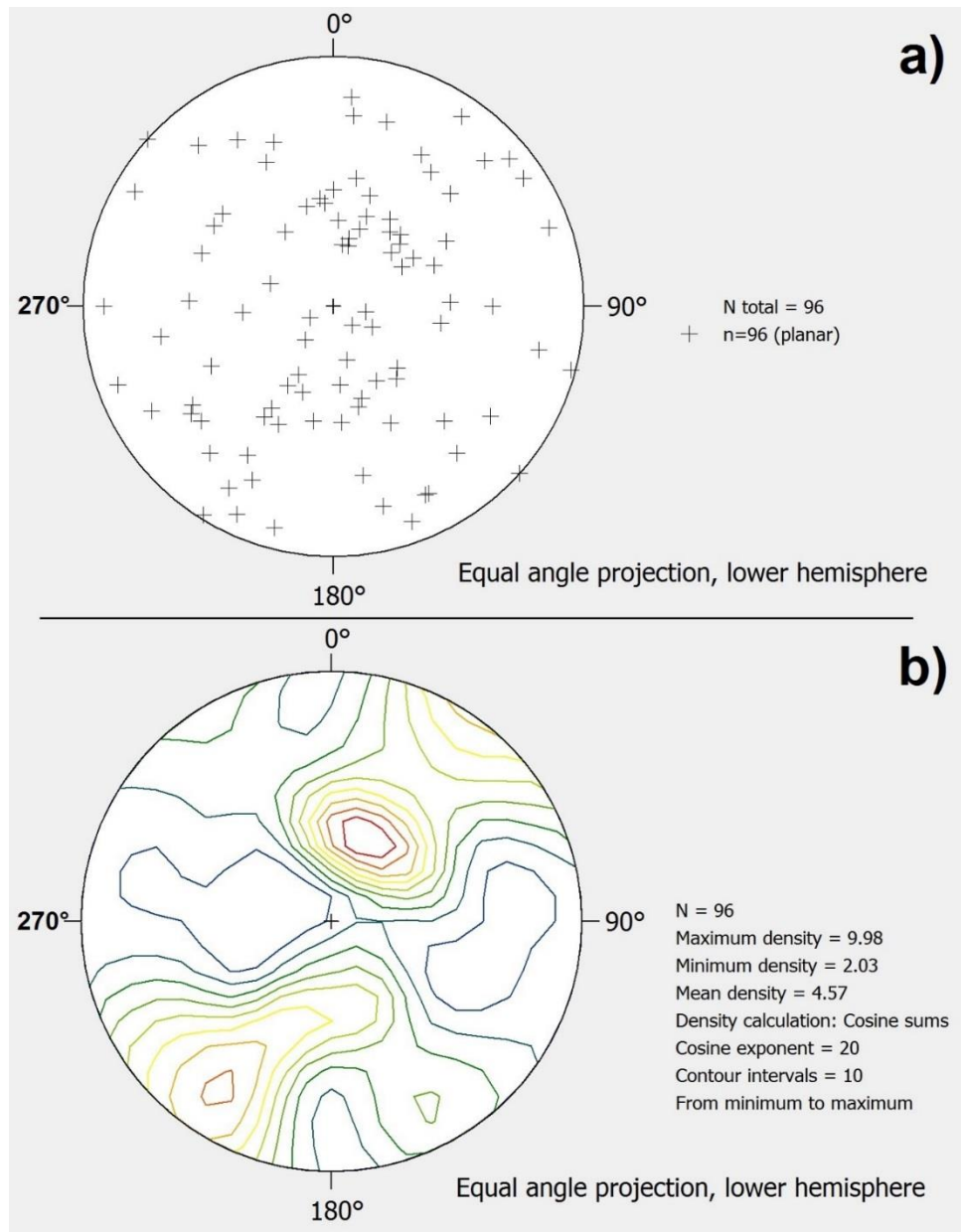


Figura 5: a) Diagrama de puntos de los datos de fracturas tomados en campo. b) Diagrama de contornos basado en los datos del diagrama de puntos a. Diagramas elaborados en el programa Stereo32, versión libre.

IV.4.2 Simulaciones de avalanchas de escombros.

Los diferentes escenarios permitieron conocer los posibles alcances que podría tener una avalancha de escombros en la actualidad. Las avalanchas se simularon desde distintos

puntos de partida (orígenes) y con distintos volúmenes. Para la avalancha simulada con el MDT reconstruido (figura 6) se usaron los parámetros presentados en la tabla 1.

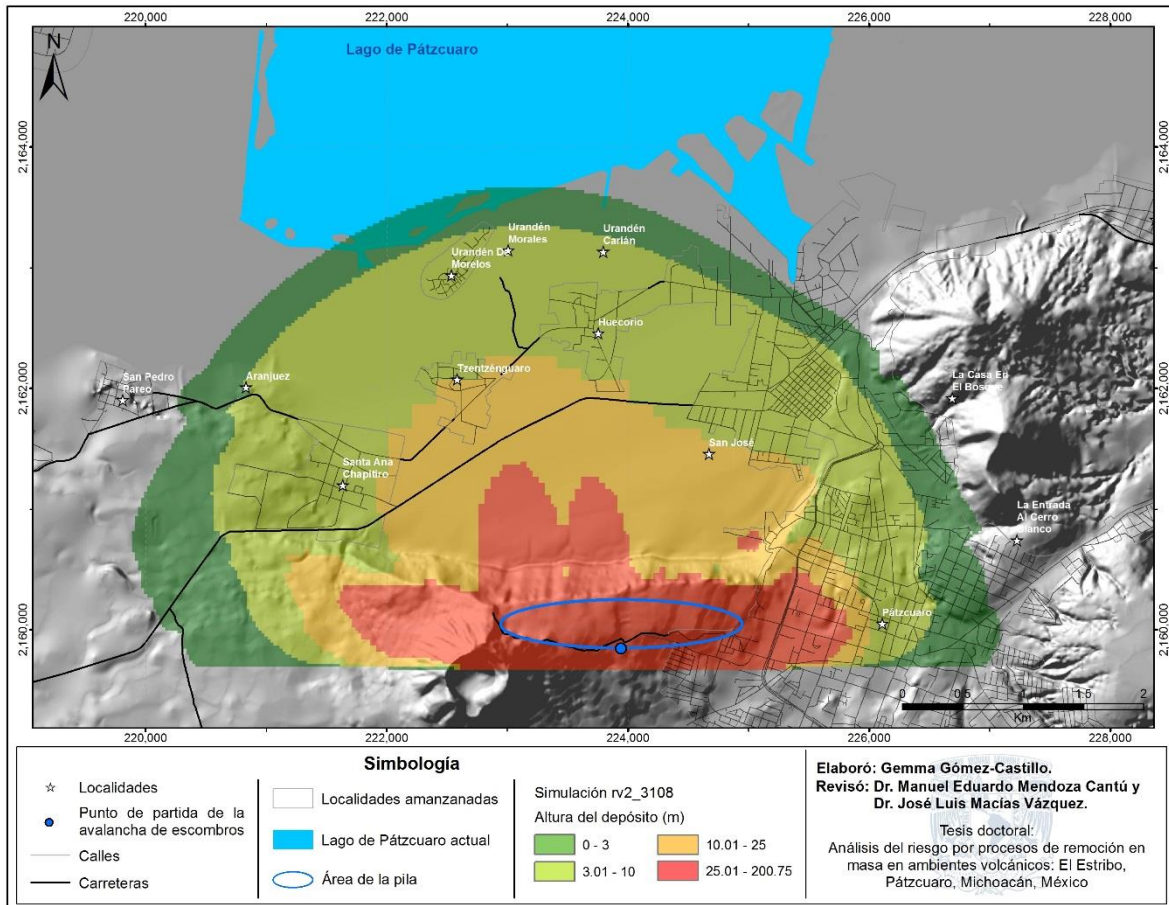


Figura 6: Simulación de la avalancha de escombros ocurrida hace ~28,000 años, con el escarpe y el MDT reconstruido. Las localidades y el lago se ilustran como referencia.

Los valores obtenidos en la simulación con el MDT reconstruido permitieron extrapolar valores para el caso de las simulaciones con el MDT actual; sin embargo, es importante aclarar que el valor para el ángulo de fricción basal no puede ser el mismo, ya que hace 28,000 años el cuerpo de agua llegaba hasta la zona del escarpe de falla (Pola *et al.*, 2014b), con lo cual se explica la hipermobilidad de la primera avalancha de escombros y el valor tan bajo del ángulo de fricción basal que se usó para la simulación (Voight y Sousa, 1994; Mohrig *et al.*, 1998; Elverhøi *et al.*, 2000; Hürlimann *et al.*, 2000; Locat y Lee, 2000; Okura *et al.*, 2000; Legros, 2002; De Blasio *et al.*, 2004; Iltad *et al.*, 2004; De Blasio *et al.*, 2006; Gauer *et al.*, 2006; Mazzanti y De Blasio, 2010; Pudasaini y Miller,

2013). Para el caso de las simulaciones de avalanchas de probable ocurrencia en el futuro se usó un ángulo de fricción basal de 16°.

Los escenarios de las simulaciones con el MDT actual fueron 2 (figura 7). El primero con volumen de material moderado (36.68 millones de metros cúbicos –en adelante Mm³-) y uno con mayor volumen (57.41 Mm³). Se eligieron 3 puntos de partida de las avalanchas de escombros a lo largo del escarpe de falla, estos puntos de partida varían algunos metros debido a que deben situar en el centro de la pila de material que se moverá y estas últimas si varían en ubicación.

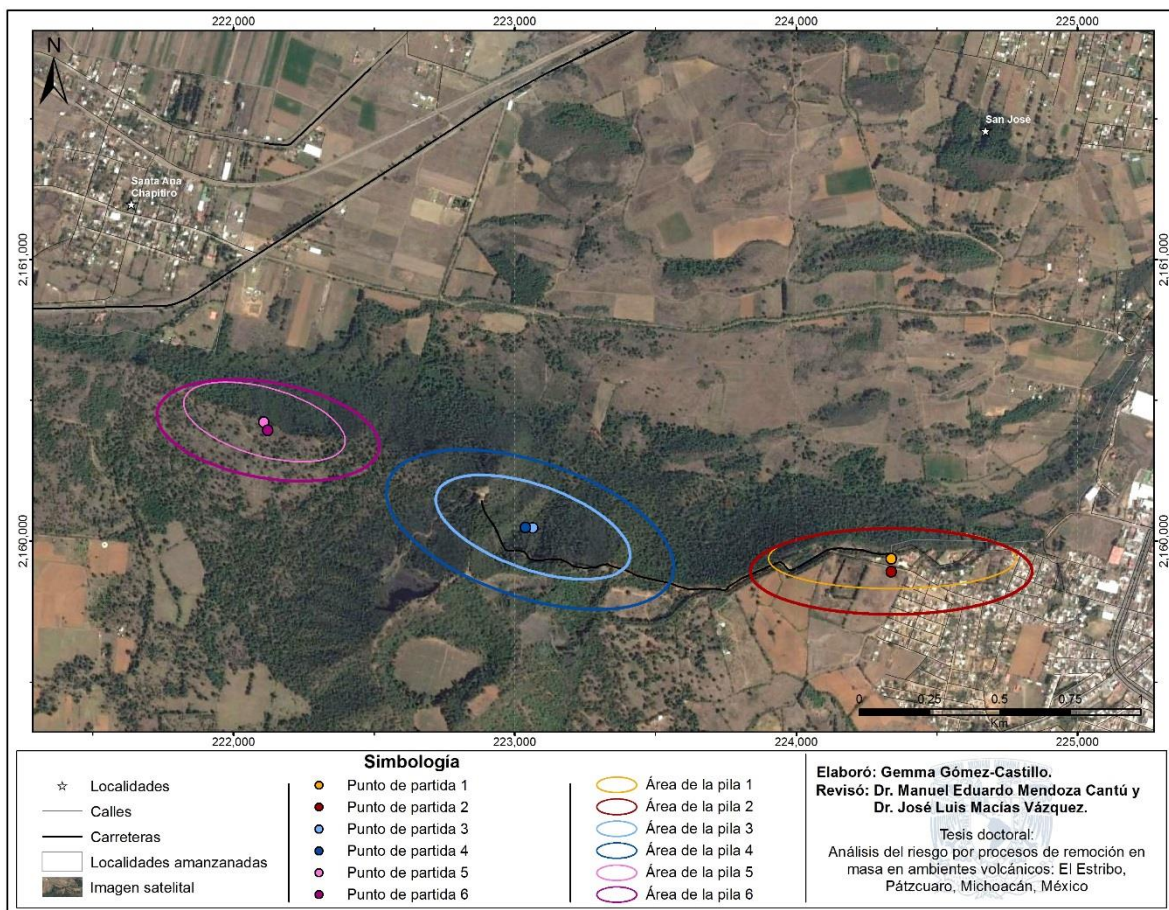


Figura 7: Localización de los puntos de partida de las avalanchas simuladas y áreas de las pilas en sus diversos escenarios.

En la siguiente tabla se muestran las coordenadas y datos de volumen para cada punto y pila:

Punto	Coordenadas X	Coordenadas Y	Pila	Altura (m)	Eje mayor (m)	Eje menor (m)	Volumen (Mm ³)
1	224,342	2,159,938	1	124	880	214	36.68
2	224,338	2,159,892	2	120	1002	304	57.41
3	223,063	2,160,047	3	197	723	297	66.44
4	223,038	2,160,048	4	207	1065	481	166.56
5	222,108	2,160,423	5	143	593	242	32.23
6	222,122	2,160,394	6	153	795	337	64.38

Tabla 2: Parámetros de entrada de las distintas simulaciones de avalanchas de escombros para la falla Pátzcuaro. Los puntos y las pilas se corresponden con los mostrados en la figura 6.

De acuerdo a las simulaciones de avalanchas elaboradas en el programa Titan2D, el punto de partida 1 afectaría un área de 5,897,150 m² (589.715 ha). La diferenciación por magnitud expresada por la altura de los depósitos se dividió de 0 a 3 metros, el cual cubrió una superficie de 2,896,210m²; de 3.01 a 10 metros cubrió una superficie de 1,718,770m²; de 10.01 a 25 metros de altura ocupó un área de 765,796 m² y finalmente, para el rango de 25.01 a 123.29 metros de altura del depósito, la superficie afectada fue de 516,374m² (figura 8a). En la tabla 3 se resumen los resultados de las simulaciones 2 a la 6, a su vez que las figuras 9 y 10 muestran gráficamente estos resultados.

Punto de partida	Superficie cubierta por cada altura de depósito (Mm ²)				
	0-3 m	3.1 - 10m	10.1 a 25m	Más de 25 m	Total
2	3.398	3.524	0.872	1.333	9.129
3	3.513	6.358	1.149	1.661	12.682
4	3.441	9.504	3.166	3.055	19.167
5	4.664	2.857	0.582	0.799	8.903
6	3.522	5.949	1.101	1.452	12.025

Tabla 3: Superficies abarcadas por cada rango de altura de depósito para los distintos puntos de partida de las simulaciones de avalanchas de escombros. Mm²= millones de metros cuadrados.

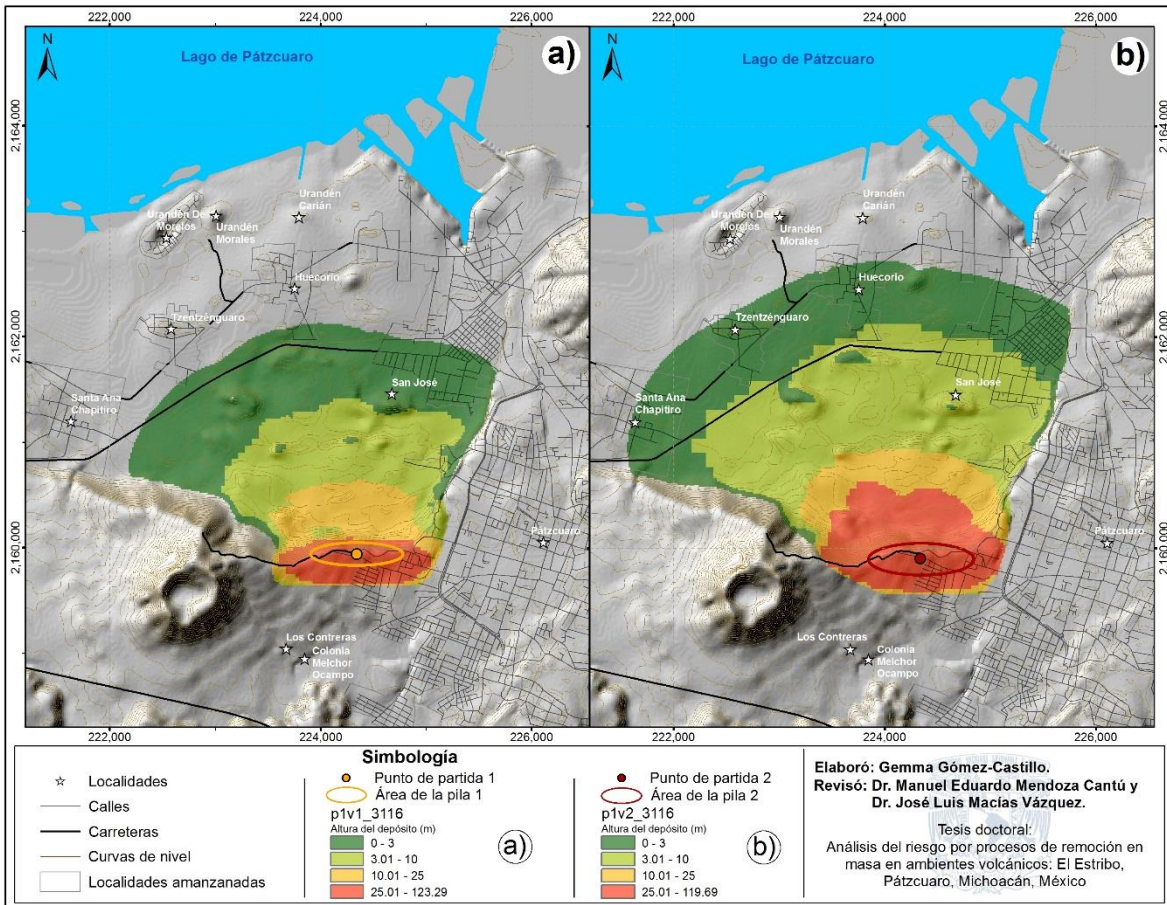


Figura 8: Resultados de las simulaciones hechas en Titan2D, para los puntos de partida 1 y 2.

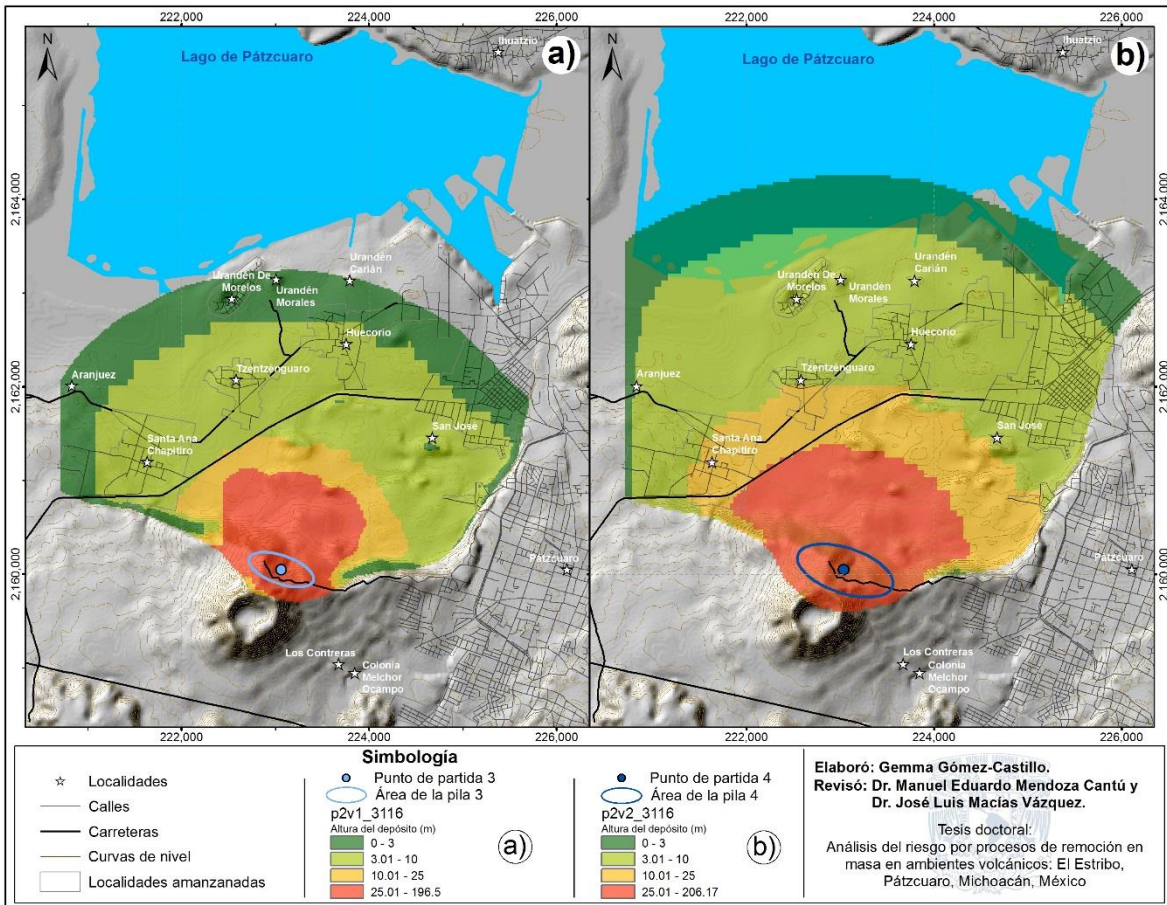


Figura 9: Resultados de las simulaciones hechas en Titan2D, para los puntos de partida 3 y 4.

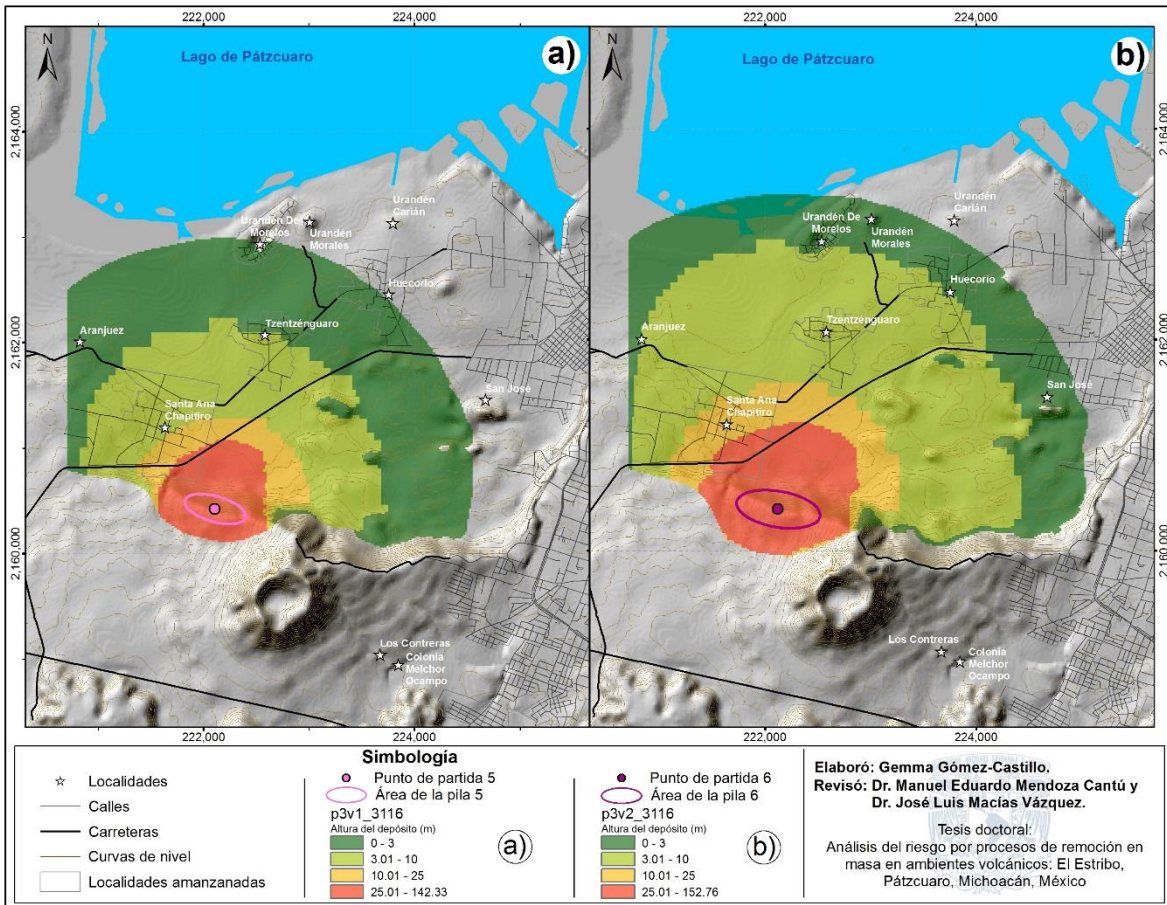


Figura 10: Resultados de las simulaciones hechas en Titan2D, para los puntos de partida 5 y 6.

En las figuras 8, 9 y 10 se aprecia que el peor escenario sería una avalancha producida en la zona del mirador (base del cono de escorias, punto 4) debido a la gran cantidad de material que podría ser removilizado y la distancia que podría alcanzar. La avalancha que menor área afectaría sería la avalancha con menor volumen, originada en el punto 1 (figura 8a), aunado a que no se encuentran muchos centros de población a su paso.

Se elaboraron dos perfiles topográficos que permiten visualizar con mayor facilidad el comportamiento y afectaciones que podrían causar las avalanchas de escombros (figura 11). Para el perfil A-A' (figura 12a) se tomó el peor escenario posible (punto 4, figura 9b) y el perfil B-B' corresponde a la zona oeste del escarpe, donde no se tienen evidencias de PRM considerables pero es una de las áreas más pobladas de la zona de estudio, ubicado en el punto de partida 5 (figura 12b).

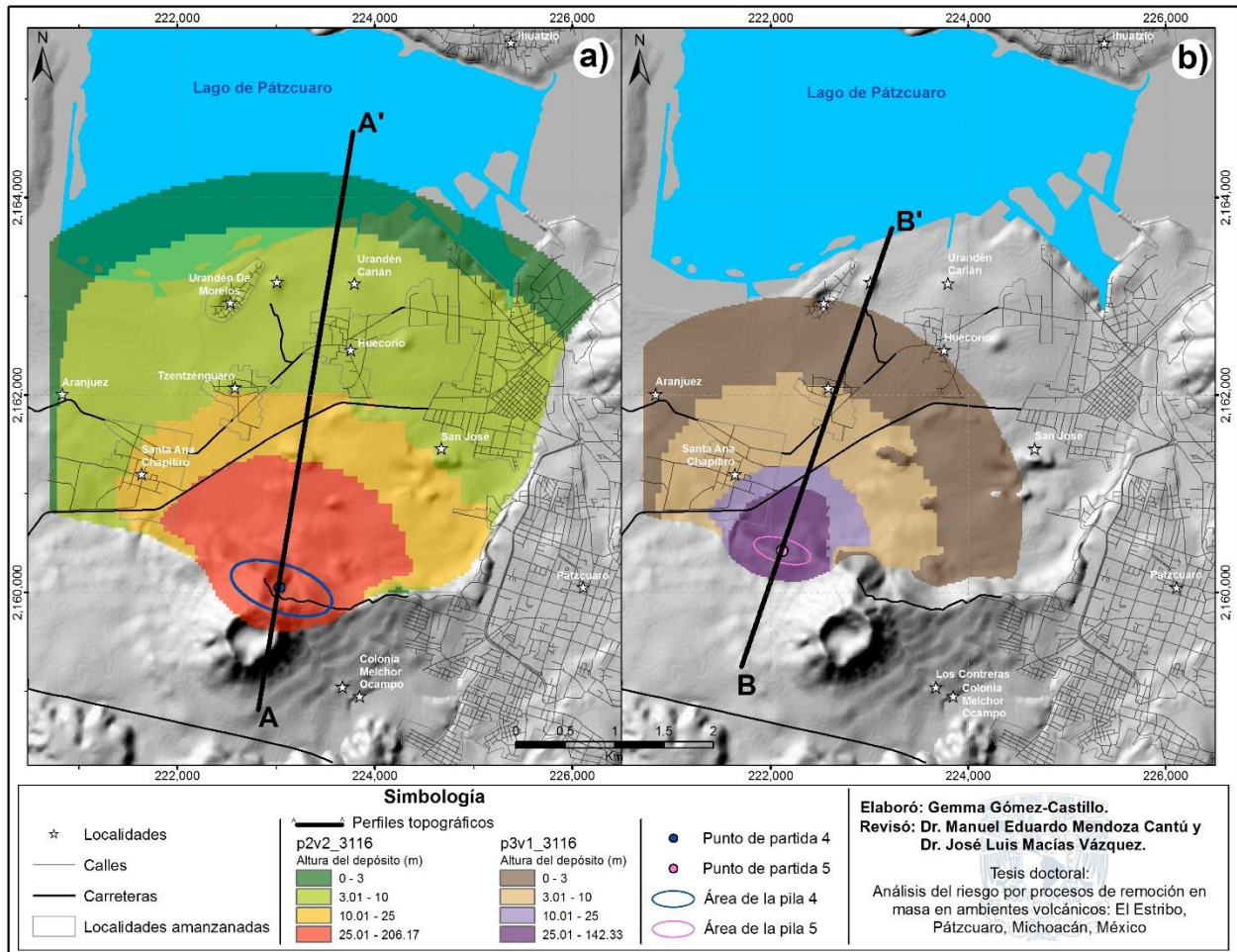


Figura 11: Localización de los perfiles topográficos y sus respectivas avalanchas de escombros.

En el perfil A-A' (punto de partida 4) se aprecia que una avalancha de escombros con 4676 metros de longitud afectaría a los poblados de San José, Santa Ana Chapitiro, Tzentzenguaro, Huecorio, Urandén Carían, Urandén de Morales, Urandén Morelos y las colonias de Pátzcuaro por debajo del escarpe de falla y llegaría hasta el borde del lago de Pátzcuaro. Las áreas con la mayor afectación se encuentran en las cercanías del escarpe, donde se localiza el mayor espesor del depósito (color naranja-rojo), abarcando una longitud de 1,732 metros; posteriormente, el peligro alto (color amarillo), con una longitud de 711 metros; a continuación se representa el peligro moderado (color verde claro), que abarca una longitud de 1,700 metros; finalmente, el peligro bajo se representa en color verde y abarca una longitud de 533 metros. Este escenario podría causar el colapso parcial del cono de escorias El Estribo.

En el perfil B-B' que muestra la longitud de la avalancha de escombros oeste se aprecia que afectaría principalmente al poblado de Santa Ana Chapitiro y, en menor medida, a Tzetzénguaru. Esta avalancha tendría una extensión máxima de 2,880 metros y no llegaría al Lago de Pátzcuaro. El escenario de la avalancha oeste (punto de partida 5; figura 12b), muestra el área de mayor afectación, corresponde al color morado y tiene una longitud de 980 m; la zona con peligro alto se indica con el color lila y se extiende por 220 m de longitud, el peligro moderado, indicado con color beige, abarcando 860 m de longitud; finalmente, la zona de peligro bajo, en color café y tiene 820 m de longitud.

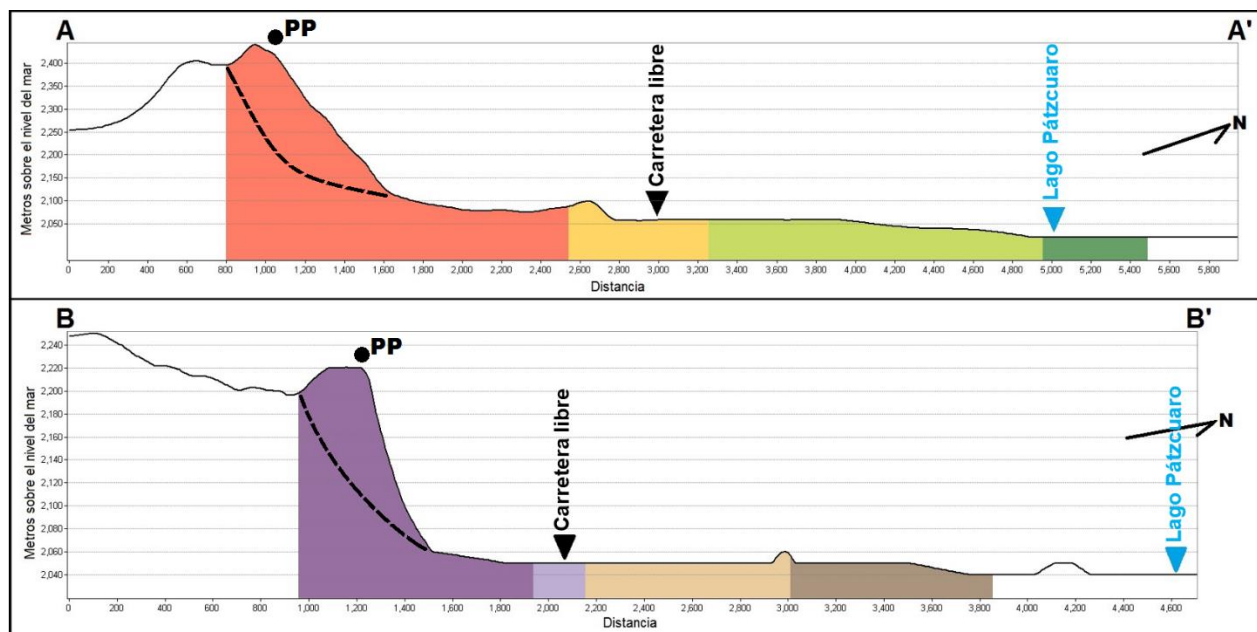


Figura 12: Perfiles topográficos y su peligrosidad por espesor del depósito. Los colores se corresponden con los de la figura 11. PP es el punto de partida de la simulación de avalancha, el triángulo negro señala por donde pasa la carretera libre Pátzcuaro-Uruapan, el triángulo azul indica donde comienza el lago de Pátzcuaro.

IV.4.3 Otros PRM asociados a altas pendientes.

Con respecto a otros PRM que se puedan asociar a altas pendientes, no se lograron identificar más de ellos en campo ni con fotointerpretación, aunado a que en la bibliografía tampoco se han reportado, únicamente algunos encuestados indicaron que hace unos 30 años ocurrió una tormenta muy fuerte y eso provocó que “una serpiente de agua” azotara unos 400 m al este del mirador y eso causó un deslave de lodo; sin embargo, en los recorridos de campo no se pudo encontrar evidencia ni depósitos de ese fenómeno.

Por otro lado, se lograron identificar algunas áreas con árboles inclinados en dirección de la pendiente (figura 13), lo cual es evidencia de la presencia de procesos de reptación. Estas áreas son muy pequeñas y no estaban afectando ninguna actividad o infraestructura humana. La primera de ellas (figura 13a) fue identificada en las coordenadas 224455/2160028 y la segunda (figura 13b) se encontró en las coordenadas 224095/2160045.

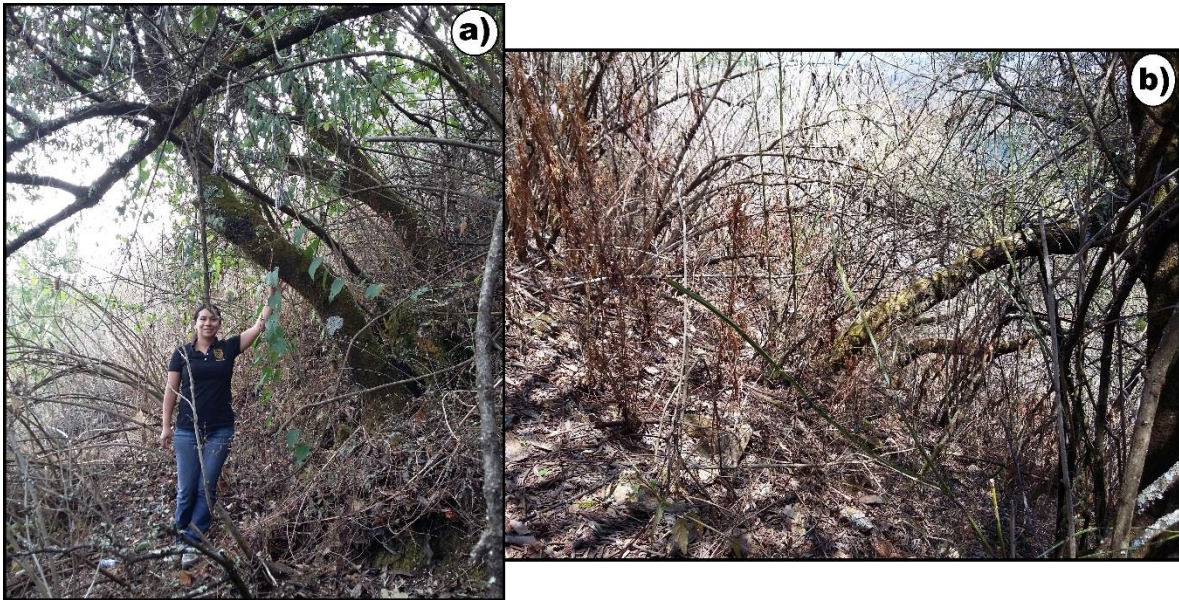


Figura 13: Pequeñas áreas con árboles inclinados en dirección de la pendiente, los cuales nos indicarían procesos de reptación.

IV.5 Discusión

Los mapas de peligros son los instrumentos más importantes para representar las áreas que pueden ser potencialmente afectadas por los fenómenos naturales (ej. deslizamientos). Adicionalmente, en zonas tectónicamente activas o volcanes activos estos mapas son útiles para la evaluación de los peligros por científicos expertos y para planear su mitigación por parte de las autoridades de protección civil y los tomadores de decisiones, además de ser una herramienta útil de información para el público general (Sheridan *et al.*, 2010). En este sentido, la construcción de escenarios de avalanchas de escombros por un posible colapso del escarpe de falla del Estribo representa una buena aproximación.

Los rangos usados para la peligrosidad por altura del depósito fueron determinados teniendo en consideración las afectaciones por espesor que pueden llegar a causar las avalanchas de escombros, ya que en la bibliografía no se encontró alguna referencia que relacione el nivel de peligrosidad con la altura del depósito. Por mencionar algunas aproximaciones, Jakob y Hungr (2005) presentan niveles de peligrosidad para flujos de escombros de acuerdo al espesor del depósito; sin embargo, sus datos no se pueden extrapolar a nuestro caso, debido al comportamiento tan diferente que presenta una avalancha de escombros (seca) en contraste con un flujo de escombros (transportado por agua). Carrasco-Núñez *et al.* (2011) presentaron un mapa de peligros por altura de depósitos en avalanchas de escombros, pero manejaron rangos de 30 metros y no explican los criterios con que fueron delimitados.

Los escenarios empleados en este trabajo se han elaborado a partir de datos de avalanchas de escombros ocurridas en el pasado, pero adecuándolos a los cambios que han ocurrido en la zona y el más representativo de ellos es el descenso en el nivel del lago de Pátzcuaro (Chacón-Torres *et al.*, 1991; O'Hara, 1993; Isradé-Alcántara *et al.*, 2005; Newton *et al.*, 2005; Garduño-Monroy *et al.*, 2011; Pola *et al.*, 2014a; Pola *et al.*, 2014b; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018), de lo contrario, se tendría que haber usado un ángulo de fricción basal muy bajo en las simulaciones.

La simulación de avalanchas de escombros se elaboró en el programa Titan2D dado que ha sido probado en varios estudios previos (Pitman *et al.*, 2003; Sheridan *et al.*, 2005; Capra *et al.*, 2008; Cortés *et al.*, 2010; Procter *et al.*, 2010; Sheridan *et al.*, 2010; Sulpizio *et al.*, 2010; Carrasco-Núñez *et al.*, 2011; Charbonnier *et al.*, 2015). Este programa permite presentar los resultados de manera fácil en un sistema de información geográfica como una capa ráster de alturas de depósitos, lo cual facilita el análisis e interpretación de los mismos.

Un insumo muy importante para llevar a cabo la simulación de la avalancha de escombros con el relieve de hace 28,000 años fue el volumen original. Existen diferencias significativas en los cálculos de este dato en la literatura, por ejemplo Pola *et al.* (2014a) propusieron un volumen de 0.05 km³ (para las dos avalanchas en conjunto) Isradé-Alcántara *et al.* (2005) mencionaron 1.8 km³ y Ortíz-Hurtado (2005) reportó 0.24 km³. Debido a las discrepancias anteriores, se procedió a realizar un ejercicio propio de

cálculo de volumen con el siguiente método: primero, se delineó el área ocupada por los depósitos y montículos actuales (MDT actual) y la delimitación se hizo en base a la ubicación de los montículos y a la geología reportada por Pola *et al.* (2014a), como se muestra en la figura 14 en contorno rojo. Segundo, se calculó el volumen a partir de la cota de 2040 msnm, estimándose de 184,403,823 m³ (0.184 km³) de material. Con este volumen se realizó la simulación de la avalancha inicial con una altura de la pila de 200 m, eje mayor de 2000 m y eje menor de 400 m (polígono con línea naranja, figura 13) (200x2000x400=160,000,000m³), aunque el programa Titan2D arrojó un volumen estimado de 251,327,412m³ para esas mismas medidas (ya que este programa considera los detalles topográficos a ser removidos). Sin embargo, consideramos que nuestros cálculos son adecuados, porque los resultados obtenidos con las simulaciones abarcan las áreas necesarias con los espesores esperados y coinciden con al menos un autor (Ortiz-Hurtado, 2005).

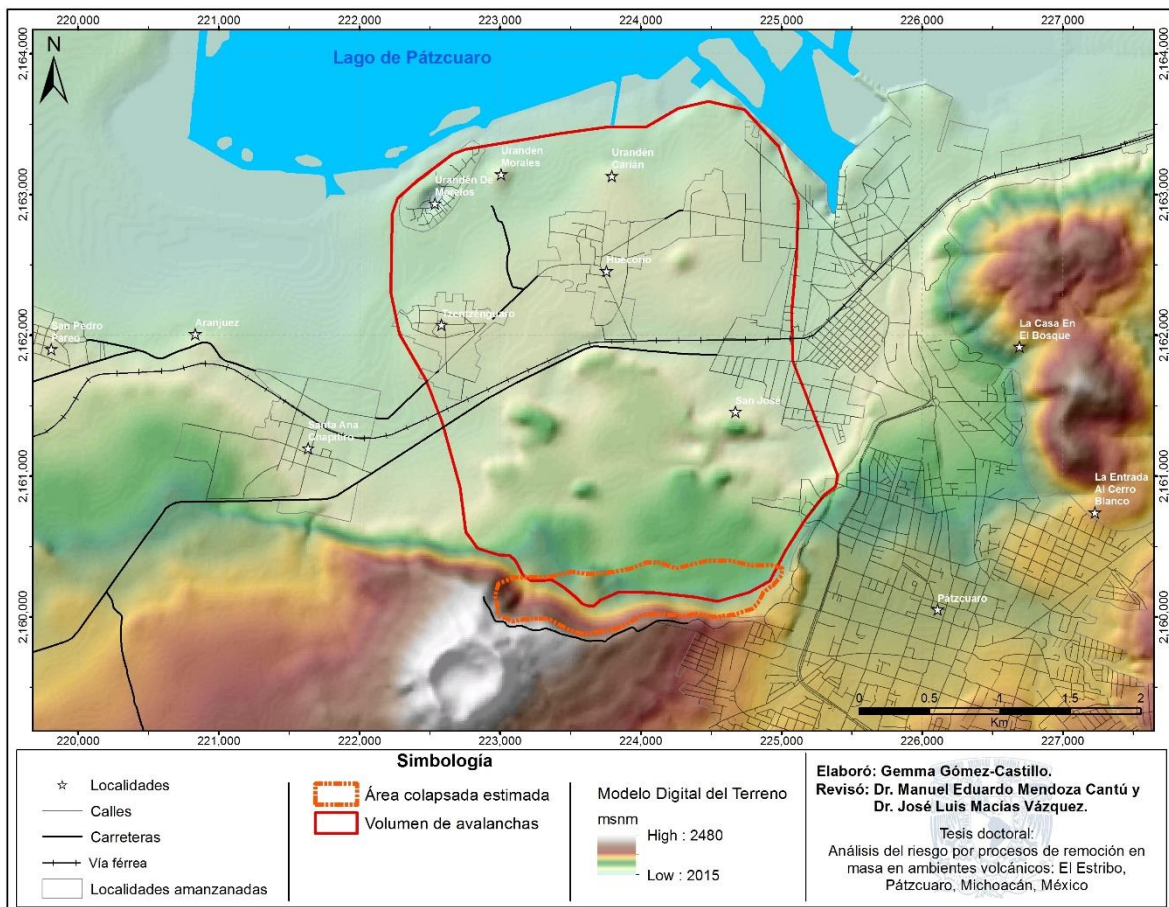


Figura 14: Estimación del volumen de los depósitos de las avalanchas de escombros calculados a partir del MDT actual y probable área colapsada en la avalancha de escombros ocurrida hace $28,360 \pm 170$ años antes del presente (Pola *et al.*, 2014a).

Para presentar un mapa de peligros único se integraron los resultados de las tres simulaciones de avalanchas de menor volumen (avalanchas 1, 3 y 5), a fin de contar con un escenario unificado y más útil para posteriormente evaluar la vulnerabilidad y el riesgo. La integración de esta información se realizó uniando las bases de datos de las tres simulaciones considerando el valor máximo del espesor en las celdas que se superponían. Este ejercicio permitió identificar la superficie total de las zonas que podrían verse afectadas en los distintos escenarios. Este modelo espacial facilitó la visualización, así como la delimitación de las áreas afectadas, incrementando la comprensión de los alcances del fenómeno. En este caso, se eligieron las avalanchas de menor volumen por considerarse que podrían ser las de ocurrencia más probable. En la figura 15 podemos apreciar el modelo integrado con los distintos depósitos simulados.

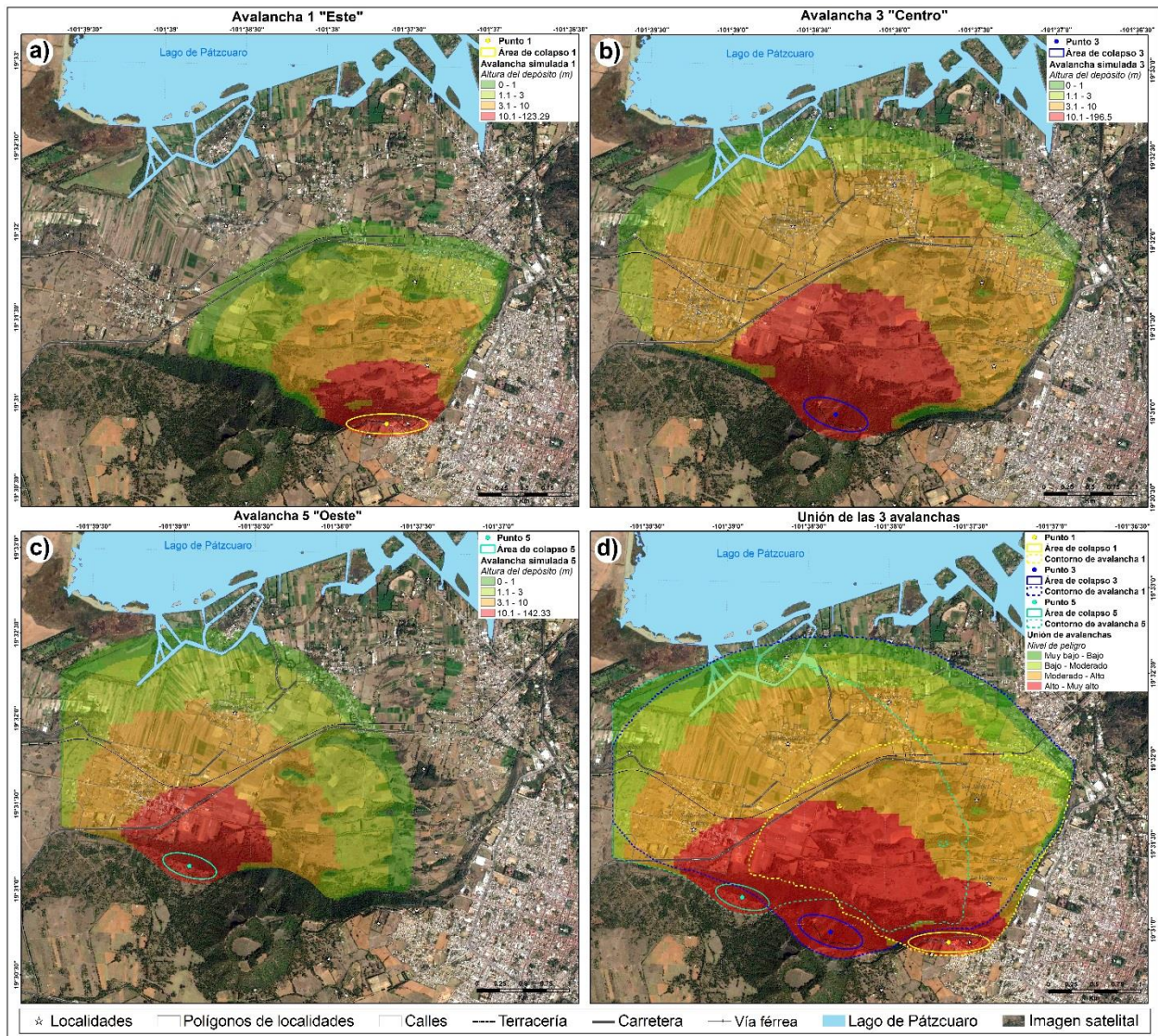


Figura 15: Mapas de peligro por avalanchas de escombros que muestran los distintos niveles de peligro de acuerdo a las alturas de los depósitos obtenidas en las simulaciones realizadas con Titan2D. a) Avalancha 1 "Este". b) Avalancha 3 "Centro". c) Avalancha 5 "Oeste". d) Unión o mosaico de las 3 avalanchas anteriores, considerando el máximo valor de espesor en las celdas que se superponían, esta unión es la que se usa para la evaluación del riesgo. La simbología que se muestra en la parte inferior es válida para los cuatro mapas de peligros.

En lo que corresponde a los demás PRM, por medio de los recorridos de campo es posible apreciar que esos peligros son puntuales y están alejados de las zonas pobladas, con lo cual no representan un riesgo considerable a las personas e infraestructura en la zona del escarpe de falla, pero no por ello se deben descartar, ya que esta es una zona de alta sismicidad. Por ejemplo, Isradé-Alcántara *et al.* (2005) y

Garduño-Monroy *et al.* (2009a) propusieron deformación cosísmica de los depósitos lacustres del Holoceno en la zona de Jarácuaro. En tiempos históricos se tienen evidencias de actividad sísmica en la zona del lago de Pátzcuaro que han provocado tsunamis (Garduño-Monroy *et al.*, 2011). Aunado a esto, existe información acerca de sismos con epicentro en otros lugares que han afectado gravemente la zona de Pátzcuaro (tabla 3), algunos de los cuales podrían disparar avalanchas de escombros y deslizamientos importantes (Keefer, 1994).

Año	Magnitud aproximada	Daños reportados	Fuente
1541		Se reportaron para Michoacán 4 años de sismos	A
1728		Sismos en Charo que pudieron haberse sentido en Pátzcuaro	A
1732		Sismo reportado en Valladolid que provocó ruptura de fuentes de agua	A
1758		Derribó la torre de la catedral	B
1845	Intensidad VIII	Afectó gravemente la catedral. Sismo de Santa Teresa	B
19/6/1858*	Intensidad IX	Derribó nuevamente una torre de la catedral, produjo un tsunami de 2 metros	B
1873		Sismo sentido en la capital de Michoacán, probablemente también sentido en Pátzcuaro	A
1880 feb y mar		Temblores reportados en la zona centro del Estado	A
Julio 1882		Temblores reportados en la zona centro del Estado	A
23/10/1889		Sismo que causó daños en varias poblaciones del centro del Estado, a las 6 am	A
16/3/1895	Int V	Temblores oscilatorio y de trepidación. Reportado en 11 municipios del centro del Estado	C
5/4/1895	Int IV	2:13 am fuerte temblor que se sintió principalmente en Uruapan y tuvo una réplica a las 5am	C
27/9/1895	Int IV	Fuerte temblor con características trepidatorias y oscilatorias, 7 seg	C
2/3/1896	Int V	Originado en la costa Jalisco-Michoacán	C
1957 junio y julio		Sismos reportados en Morelia que afectaron otras partes del país.	A
4/9/2002	4.1	El más cercano a Pátzcuaro. 19.773°N, 101.559° W. Depth 4.2 km	D

Tabla 4: Sismicidad histórica de la zona de Pátzcuaro y centro de Michoacán. Fuentes: a) Catálogo histórico sobre fenómenos naturales asociados a catástrofes sociales en Michoacán, 1454-1985 (Carreón y Trejo Barajas, 1985); b) Los sismos en la historia de México (García Acosta y Suárez Reynoso, 1996); c) <http://sismoshistoricos.org> (García Acosta y Suárez Reynoso, 2014); d) <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (USGS, 2016).

IV.6 Conclusiones

Los mapas de peligros representan una herramienta valiosa para estimar el área que podría verse afectada por un PRM. Estos mapas representan un insumo útil para el análisis de riesgo al que estaría sujeta la población y la infraestructura en caso de un evento futuro en la región. Esta información es clave para sustentar las decisiones de las autoridades locales (Protección Civil y los líderes de las comunidades), así como en la creación de un sistema de monitoreo, advertencia y manejo de contingencias.

En este trabajo se presentan algunas de las simulaciones que se llevaron a cabo, que en su conjunto ayudaron a calibrar adecuadamente los parámetros de entrada. Las simulaciones permitieron identificar que el volumen de la pila y el ángulo de fricción basal son los datos de entrada más importantes en las simulaciones en Titan2D, los cuales determinan el área a cubrir y la movilidad de la avalancha.

Los escenarios de avalanchas de escombros fueron creados con una metodología reproducible en otras zonas con antecedentes de fenómenos similares. Sin embargo, esta zona tiene la particularidad de estar asentada sobre una falla activa, la cual podría representar en un futuro un peligro alto para la población cercana. En consecuencia, se recomienda que la zona del escarpe se reserve estrictamente para uso forestal y que se amplíe la cobertura del Área Natural Protegida de categoría estatal sobre la cual se asienta esta zona. Se recomienda también que se alerte y oriente a la población vecina sobre las características geológicas, actividad sísmica y, sobre todo, qué hacer ante un sismo fuerte y la ocurrencia de una avalancha de escombros mayor; la mayoría de la población desconoce la presencia de la falla y que vive en una zona de peligrosidad sísmica alta. Finalmente, es importante mencionar que las afectaciones de los sismos históricos no sólo han sido en el escarpe de la falla o el lago de Pátzcuaro, sino que han representado afectaciones en iglesias y casas de la región, por lo cual se debe instar a la población a que, en la medida de sus posibilidades, reemplace los actuales materiales de construcción (p.e. adobe), y que refuercen sus viviendas, así como que se monitoree el movimiento de las grietas o desniveles que se detecten en ellas.

IV.7 Bibliografía

- Barton, N. y Choubey, V. 1977. The shear strength of joints in theory and in practice. *Rock Mechanics*, 10, 1-65.
- Canonical-Ltd. 2012. UBUNTU - Linux. 12.04 LTS Precise Pangolin. 12.04 ed.
- Capra, L., Norini, G., Gropelli, G., Macías, J. L. y Arce, J. L. 2008. Volcanic hazard zonation of the Nevado de Toluca volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 469–484.
- Carrasco-Núñez, G., Siebert, L. y Capra, L. 2011. Hazards from volcanic avalanches. In: VERESS, B. & SZIGETHY, J. (eds.) *Horizons in Earth Science Research*. Nova Science Publishers, Inc.
- Carreón, M. C. y Trejo Barajas, D. 1985. *Catálogo histórico sobre fenómenos naturales asociados a catástrofes sociales en Michoacán, 1454-1985*, Michoacán, México.
- Castañeda-Leonides, F. 2011. *Análisis de Peligros por Procesos de Remoción en Masa en Estructuras Volcánicas*. Maestría en Geociencias y administración de recursos naturales, Instituto Politécnico Nacional.
- Cortés, A., Macías, J. L., Capra, L. y Garduño-Monroy, V. H. 2010. Sector collapse of the SW flank of Volcán de Colima, México The 3600 yr BP La Lumbre–Los Ganchos debris avalanche and associated debris flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197, 52–66.
- Chacón-Torres, A., Pérez-Mungía, R. y Muzquiz-Irbe, L. E. 1991. Síntesis limnológica del lago de Pátzcuaro, Michoacán, México. *Biología Acuática 1. Secretaría de Difusión Cultural. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo*, 53.
- Charbonnier, S. J., Palma, J. L. y Ogburn, S. 2015. Application of “shallow-water” numerical models for hazard assessment of volcanic flows: The case of Titan2D and Turrialba volcano (Costa Rica). *Revista Geológica de América Central*, 52, 107-128.
- De Blasio, F. V., Elverhøi, A., Engvik, L., Issler, D., Gauer, P. y Harbitz, C. B. 2006. Understanding the high mobility of subaqueous debris flows. *Norwegian Journal of Geology*, 86, 275-284.
- De Blasio, F. V., Engvik, L., Harbitz, C. B. y Elverhøi, A. 2004. Hydroplaning and submarine debris flows. *Journal of Geophysical Research*, 109, 15.
- Elverhøi, A., Harbitz, C. B., Dimakis, P., Mohrig, D., Marr, J. y Parker, G. 2000. On the dynamics of subaqueous debris flows. *Oceanography*, 13, 109-117.
- García Acosta, V. y Suárez Reynoso, G. 1996. *Los sismos en la historia de México*, México, FCE, UNAM, CIESAS.
- García Acosta, V. y Suárez Reynoso, G. 2014. *Catálogo de Sismos Históricos de México. Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México*. <http://sismoshistoricos.org/panel/web/> [Online]. [Accessed 20/01/2016].
- Garduño-Monroy, V. H., Chávez-Hernández, J., Aguirre-González, J., Vázquez-Rosas, R., Mijares Arellano, H., Israde-Alcántara, I., Hernández-Madrigal, V. M., Rodríguez-Pascua, M. A. y Pérez López, R. 2009a. Zonificación de los periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Mich., México, con base en microtemores y estudios de paleosismología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26, 623-637.
- Garduño-Monroy, V. H., Pérez-Lopez, R., Israde-Alcantara, I., Rodríguez-Pascua, M. A., Szykaruk, 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. 2009b. Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico *Geofísica Internacional*, 48, 319-335.
- Garduño-Monroy, V. H., Soria-Caballero, D. C., Israde-Alcántara, I., Hernández-Madrigal, V. M., Rodríguez-Ramírez, A., Ostroumov, M., Rodríguez-Pascua, M. A., Chacon-Torres, A. y Mora-Chaparro, J. C. 2011. Evidence of tsunami events in the paleolimnological record of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México. *Geofísica Internacional*, 50, 147-161.

- Gauer, P., Elverhøi, A., Issler, D. y De Blasio, F. V. 2006. On numerical simulations of subaqueous slides: Back calculations of laboratory experiments of clay-rich slides. *Norwegian Journal of Geology*, 86, 295-300.
- Gmfg, G. M. F. G. 2007. Titan2D. In: BUFFALO, S. U. O. N. Y. S. A. (ed.) 4.0 ed.
- Hoek, E. y Bray, J. W. 1981. *Rock slope engineering*, London, Institute of Mining and Metallurgy
- Hoek, E., Kaiser, P. K. y Bawden, W. F. 1995. *Support of underground excavations in hard rock*, Rotterdam, Netherlands, A.A.Balkema Publishers.
- Hürlimann, M., Garcia-Piera, J. O. y Ledesma, A. 2000. Causes and mobility of large volcanic landslides: application to Tenerife, Canary Islands. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 103, 121-134.
- Illstad, T., Marr, J., Elverhøi, A. y Harbitz, C. B. 2004. Laboratory studies of subaqueous debris flows by measurements of pore-fluid pressure and total stress. *Marine Geology*, 213, 403-414.
- Inegi. 1983. *Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales E1401. Escala 1:250,000.*
- Inegi. 2008. *Conjunto de datos vectoriales de la cartografía topográfica escala 1: 20,000, clave E14A22D.*
- Isradé-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., Fisher, C. T., Pollard, H. P. y Rodríguez-Pascua, M. A. 2005. Lake level change, climate, and the impact of natural events: the role of seismic and volcanic events in the formation of the Lake Patzcuaro Basin, Michoacan, Mexico. *Quaternary International* 135, 35–46.
- Jakob, M. y Hungr, O. 2005. *Debris-flow hazards and related phenomena*, Chichester, UK, Praxis Publishing Ltd.
- Keefer, D. K. 1994. The importance of earthquake-induced landslides to long-term slope erosion and slope-failure hazards in seismically active regions. *Geomorphology*, 10, 265–284.
- Kitware, Labs, S. N. y Csimsoft 2017. ParaView. 5.5 ed. New Mexico PO Box 5800 Albuquerque, NM.
- Legros, F. 2002. The mobility of long-runout landslides. *Engineering Geology*, 63, 301-331.
- Locat, J. y Lee, H. 2000. Submarine Landslides: Advances and Challenges. *Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides*. Cardiff, U.K.
- Lukić, D. 2018. Friction angle of soil and rock. *6th International Conference Contemporary achievements in civil engineering*. Subotica, Serbia.
- Mazzanti, P. y De Blasio, F. V. 2010. Peculiar Morphologies of Subaqueous Landslide Deposits and Their Relationship to Flow Dynamics. In: MOSHER, D. C., SHIPP, C., MOSCARDELLI, L., CHAYTOR, J., BAXTER, C., LEE, H. & URGELES, R. (eds.) *Submarine Mass Movements and Their Consequences*.
- Mendoza-Ponce, A., Figueroa-Soto, A., Soria-Caballero, D. C. y Garduño-Monroy, V. H. 2018. Active faults sources for the Pátzcuaro–Acambay fault system (Mexico): fractal analysis of slip rates and magnitudes M estimated from fault length. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 3121–3135.
- Mohrig, D., Whipple, K. X., Hondzo, M., Ellis, C. y Parker, G. 1998. Hydroplaning of subaqueous debris flows. *Geological Society of America Bulletin*, 110, 387–394.
- Newton, J. A., Metcalfe, S. E., Davies, S. J., Cook, G., Barker, P. y Telford, R. J. 2005. Late Quaternary volcanic record from lakes of Michoacán, central Mexico. *Quaternary Science Reviews* 24.
- O'hara, S. L. 1993. Historical Evidence of Fluctuations in the Level of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México over the Last 600 Years. *The Geographical Journal*, 159, 51-62.
- Okura, Y., Kitahara, H. y Sammori, T. 2000. Fluidization in dry landslides. *Engineering Geology*, 56, 347-360.

- Ortíz-Hurtado, H. J. 2005. *Estudio de las propiedades físicas de los materiales involucrados en una avalancha de rocas, caso: Volcán “El Estribo”, Pátzcuaro, Michoacán*. Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Osorio-Ocampo, S., Macías, J. L., Pola, A., Cardona-Melchor, S., Sosa-Ceballos, G., Garduño-Monroy, V. H., Layer, P. W., 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 40Ar/39Ar geochronology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358, 307-328.
- Pitman, E. B., Nichita, C. C., Patra, A., Bauer, A., Sheridan, M. y Bursik, M. 2003. Computing granular avalanches and landslides. *Physics of Fluids*, 15, 3638.
- Pola, A., Macías, J. L., Garduño-Monroy, V. H., Osorio-Ocampo, S. y Cardona-Melchor, S. 2014a. Successive collapses of the El Estribo volcanic complex in the Pátzcuaro Lake, Michoacán, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289, 41–50.
- Pola, A., Macías, J. L., Osorio-Ocampo, S., Garduño-Monroy, V. H., Melchor, S. y Martínez-Martínez, J. 2014b. Geological Setting, Volcanic Stratigraphy, and Flank Failure of the El Estribo Volcano, Pátzcuaro (Michoacán, Mexico). In: . (eds) . . In: ROCHA, R., PAIS, J., KULLBERG, J. & FINNEY, S. (eds.) *STRATI 2013*. Switzerland: Springer Geology.
- 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.
- Procter, J. N., Cronin, S. J., Platz, T., Patra, A., Dalbey, K., Sheridan, M. y Neall, V. 2010. Mapping block-and-ash flow hazards based on Titan 2D simulations: a case study from Mt. Taranaki, NZ. *Natural Hazards*, 53, 483–501.
- Pudasaini, S. P. y Miller, S. A. 2013. The hypermobility of huge landslides and avalanches. *Engineering Geology* 157 124–132.
- Sheridan, M., Patra, A., Dalbey, K. y Hubbard, B. 2010. Probabilistic digital hazard maps for avalanches and massive pyroclastic flows using TITAN2D. In: GROPELLI, G. & VIERECK-GOETTE, L. (eds.) *Stratigraphy and Geology of Volcanic Areas*. Geological Society of America.
- Sheridan, M. F., Stinton, A. J., Patra, A., Pitman, E. B., Bauer, A. y Nichita, C. C. 2005. Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 89– 102.
- Sosio, R., Crosta, G. y Hungr, O. 2008. Complete dynamic modeling calibration for the Thurwieser rock avalanche (Italian Central Alps). *Engineering Geology*, 100, 11-26.
- Sosio, R., Crosta, G. y Hungr, O. 2011. Numerical modeling of debris avalanche propagation from collapse of volcanic edifices. *Landslides*, 9, 315-334.
- Sulpizio, R., Capra, L., Sarocchi, D. y Saucedo, R. 2010. Predicting the block-and-ash flow inundation areas at Volcán de Colima (Colima, Mexico) based on the present day (February 2010) status. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 193, 49–66.
- Usgs. 2016. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> [Online]. [Accessed 20/01/2016].
- Voight, B. y Sousa, J. 1994. Lessons from Ontake-san: A comparative analysis of debris avalanche dynamics. *Engineering Geology*, 38, 261-297.



**CAPÍTULO V:
VULNERABILIDAD Y RIESGO POR
PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN
EL COMPLEJO VOLCÁNICO EL
ESTRIBO, PÁTZCUARO, MICHOACÁN,
MÉXICO**

**Tesis:
Análisis del riesgo por procesos de remoción en masa
en ambientes volcánicos: El Estribo, Pátzcuaro,
Michoacán, México**



Vulnerabilidad y riesgo por procesos de remoción en masa en el complejo volcánico El

Estribo, Pátzcuaro, Michoacán, México

Gemma Gómez-Castillo ^a, Luis Miguel Morales Manilla ^b, Manuel Eduardo Mendoza Cantú ^c,

José Luis Macías ^d

Artículo próximo a traducir y someter a revista internacional

^a Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México.

Correo: ggomez@pmip.unam.mx

Teléfono: (celular) 4521019665

^b Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México.

Correo: moraman@ciga.unam.mx

Teléfono: 443322-3839 ext. 32840

^c Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México.

Correo: mmendoza@ciga.unam.mx

Teléfono: 443322-3839 ext. 32839

^d Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Campus Morelia, Antigua Carretera a Pátzcuaro núm. 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de La Huerta, C.P. 58190 Morelia, Michoacán, México.

Correo: macias@geofisica.unam.mx

Teléfono: 443 322 2777

1.- RESUMEN (250 palabras)

La evaluación espacial de la distribución del peligro y la vulnerabilidad permite construir mapas de riesgo que son empleados para proponer medidas para la reducción y mitigación de los riesgos. El presente trabajo realiza un análisis del riesgo para la zona del complejo volcánico el Estribo (CVE). El CVE es una estructura geológica localizada al sur del Lago de Pátzcuaro, la cual está conformada en la base por un volcán en escudo, coronado por un cono de escorias. En la zona han ocurrido dos avalanchas de escombros durante el Pleistoceno y se cree que estas fueron disparadas por actividad sismo-tectónica asociada a la falla Pátzcuaro. El peligro está representado por la potencial ocurrencia de avalanchas de escombros, para las cuales se hicieron siete simulaciones de algunos escenarios en el programa Titan2D, y se asignaron rangos de peligro de acuerdo con la altura del depósito resultante. La vulnerabilidad se analiza desde una perspectiva geográfica con base en la metodología SAVE, y se complementa con encuestas aplicadas a la población en general y entrevistas hechas a personas clave de la comunidad. Los resultados son los mapas de riesgo de la población, la infraestructura, las actividades económicas, los recursos naturales y la percepción del riesgo. Las zonas de mayor riesgo están ubicadas por debajo del escarpe en la localidad de Santa Ana Chapitiro, y en el sector oriental del escarpe; como consecuencia de la densidad poblacional y las condiciones de marginación y exposición al peligro. Se recomienda evitar la expansión urbana hacia estas zonas y reforzar el uso de suelo para conservación.

2.- PALABRAS CLAVE: Modelo SAVE, análisis multicriterio, avalancha de escombros, Titan2D.

Keywords: SAVE model, multicriteria analysis, debris avalanche, Titan2D

3.- INTRODUCCIÓN

La evaluación espacial de la distribución del peligro y la vulnerabilidad nos permite desarrollar mapas de riesgo, los cuales son una excelente herramienta para la generación de conocimiento que permitan que apoye la elaboración de medidas para su reducción y mitigación (Ponce-Pacheco *et al.*, 2018; Wisner *et al.*, 2003).

Los principales conceptos usados en este trabajo son el de peligro, vulnerabilidad y riesgo. El peligro es un proceso o fenómeno natural que afecta a la población, infraestructura y recursos naturales. En la zona el peligro está representado por la potencial ocurrencia de procesos de remoción en masa (PRM), los cuales se pueden definir como los fenómenos naturales que generan nuevas formas del relieve, modificando las condiciones originales de las laderas por medio de desplazamientos con diferente intensidad y velocidad (Paz Tenorio *et al.*, 2017).

La vulnerabilidad se refiere al grado de daños que un sistema, subsistema o componente del sistema puede sufrir como consecuencia de la exposición a un peligro, perturbación, o factor estresante (Turner II *et al.*, 2003). En este trabajo se analiza la vulnerabilidad por sensibilidad y la vulnerabilidad por resiliencia para los distintos elementos expuestos; la vulnerabilidad por sensibilidad frente al peligro está determinada por las condiciones humanas y ambientales intrínsecas del sistema, ante la exposición a una serie de amenazas o peligros (Turner II *et al.*, 2003). La vulnerabilidad por resiliencia es la capacidad que tiene un sistema, o parte de este, para recuperarse a un estado previo de referencia después de haber sufrido una perturbación (Turner II *et al.*, 2003). La vulnerabilidad puede expresarse como porcentaje del valor total del elemento expuesto al peligro y se debe calcular para todos los elementos similares (tipos de construcciones, cultivos, etc.), en donde el 0 es “sin daño” y el 1 es “pérdida total” (UNDRO, 1980). Para nuestra zona de estudio, se analiza la vulnerabilidad de la población, la infraestructura y los recursos

naturales mediante el modelo SAVE, el cuál fue desarrollado con base en el modelo conceptual de Turner II et al. (2003), y presenta el diseño de un modelo geográfico para la evaluación de la vulnerabilidad, basado en los conceptos de lugar, las relaciones espaciales y de los patrones. Estos conceptos son utilizados para construir un modelo geográfico integral que toma en cuenta múltiples criterios biofísicos y socioeconómicos de la vulnerabilidad (Morales-Manilla, 2010).

El riesgo se define como el número esperado de personas lesionadas o fallecidas, daños a la propiedad y la interrupción de las actividades económicas debido a un fenómeno natural particular, que en consecuencia produce riesgos y elementos en riesgo específicos (UNDRO, 1980).

Como antecedentes de esta investigación, se puede mencionar que en las cercanías de la zona de estudio se han realizado numerosos trabajos enfocados principalmente a datar los volcanes y sus estructuras adyacentes (Hasenaka *et al.*, 1985; Newton *et al.*, 2005; Pola *et al.*, 2014), cartografiarlos por diversos métodos (Johnson *et al.*, 1990), caracterizarlos geológicamente (Connor, 1987; Hasenaka, 1994; Macías, 2005) y determinar los peligros de las áreas circundantes (Garduño-Monroy *et al.*, 2009; Garduño-Monroy *et al.*, 2011; Isradé-Alcántara *et al.*, 2005). En lo que respecta al manejo, gestión y mitigación de riesgos, sólo se tiene el Reglamento de Protección Civil (Gobierno, 2016), en el cual se menciona que se debe requerir y supervisar la expedición de un Atlas de Riesgo del municipio de Pátzcuaro; sin embargo, este último no ha sido realizado aún.

Con base en lo anterior, se detectó la necesidad de la obtención y creación de información respecto al riesgo, lo cual se convirtió en el objetivo principal de este trabajo: conocer, comprender y entender la distribución del riesgo como una función de los peligros conocidos en el área, y de las características de los sujetos vulnerables, lo cual es esencial en el análisis de riesgo como insumo para la planificación y uso del suelo, así como para la prevención y mitigación del riesgo

en áreas previamente identificadas. Este estudio presenta como resultados los mapas de peligros detectados en campo y los simulados en computadora, además de identificar la vulnerabilidad del área de estudio, lo que permitió la elaboración de los mapas de riesgo para los distintos elementos expuestos.

3.1 Contexto geológico y tectónico del Complejo Volcánico El Estribo (CVE)

La Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM) es una zona de vulcanismo activo ubicada en la parte central de México, tiene una longitud aproximada de 1000 km, y abarca desde el Golfo de California hasta el Golfo de México (Garduño Monroy *et al.*, 2010; Newton *et al.*, 2005). Esta faja se encuentra sobre la placa de Norteamérica, por debajo de la cual subducen en el occidente las placas de Cocos y Rivera (Ferrari *et al.*, 2012). Dentro de la FVTM existen zonas conocidas como campos volcánicos, que pueden definirse como áreas con una alta densidad de volcanes que coexisten en tiempo y espacio; en la parte centro occidental de la FVTM se localiza el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) que contiene unos 900 conos cineríticos, 100 pequeñas estructuras (conos, domos, gruesos flujos de lava, etc.), más de 300 volcanes de tamaño medio y domos de lava, pero no existen grandes volcanes activos (figura 1a) (Hasenaka, 1994; Hasenaka *et al.*, 1994). En el CVMG se encuentran varios volcanes que presentan el colapso parcial de su edificio o estructura volcánica, uno de ellos es el complejo volcánico El Estribo (CVE), ubicado al sur del Lago de Pátzcuaro (Capra *et al.*, 2002). El CVE está conformado por un volcán en escudo en la base al cual sobreyace un cono de escorias, ambos volcanes de edades y composiciones diferentes (Pola *et al.*, 2014). El punto más alto del cono de escorias, El Estribo, se localiza a 2430 msnm, en las coordenadas 19°30'41.95"N y 101°38'31.04"O.

Respecto a la tectónica, el área de estudio forma parte de la zona oeste del sistema activo de fallas Pátzcuaro–Acambay (Mendoza-Ponce *et al.*, 2018). En el CVE se encuentran las fallas activas Jarácuaro y Pátzcuaro (figura 1b); la falla Pátzcuaro corta al volcán en escudo y ésta tiene orientación E-W con caída hacia el norte (Israde-Alcántara *et al.*, 2005; Garduño-Monroy *et al.*, 2009a; Garduño-Monroy *et al.*, 2009b; Garduño-Monroy *et al.*, 2011; Pola *et al.*, 2014a; Pola *et al.*, 2014b; Pola *et al.*, 2015; Mendoza-Ponce *et al.*, 2018; Osorio-Ocampo *et al.*, 2018). De acuerdo con Mendoza-Ponce *et al.* (2018), la falla Pátzcuaro presenta una longitud de 33 km, altura máxima del escarpe de 277 m, tasa de desplazamiento de 2.5 mm/yr^{-1} , magnitud estimada de sus sismos de M_w 6.86 y escala de intensidades (ESI 07) de hasta X.

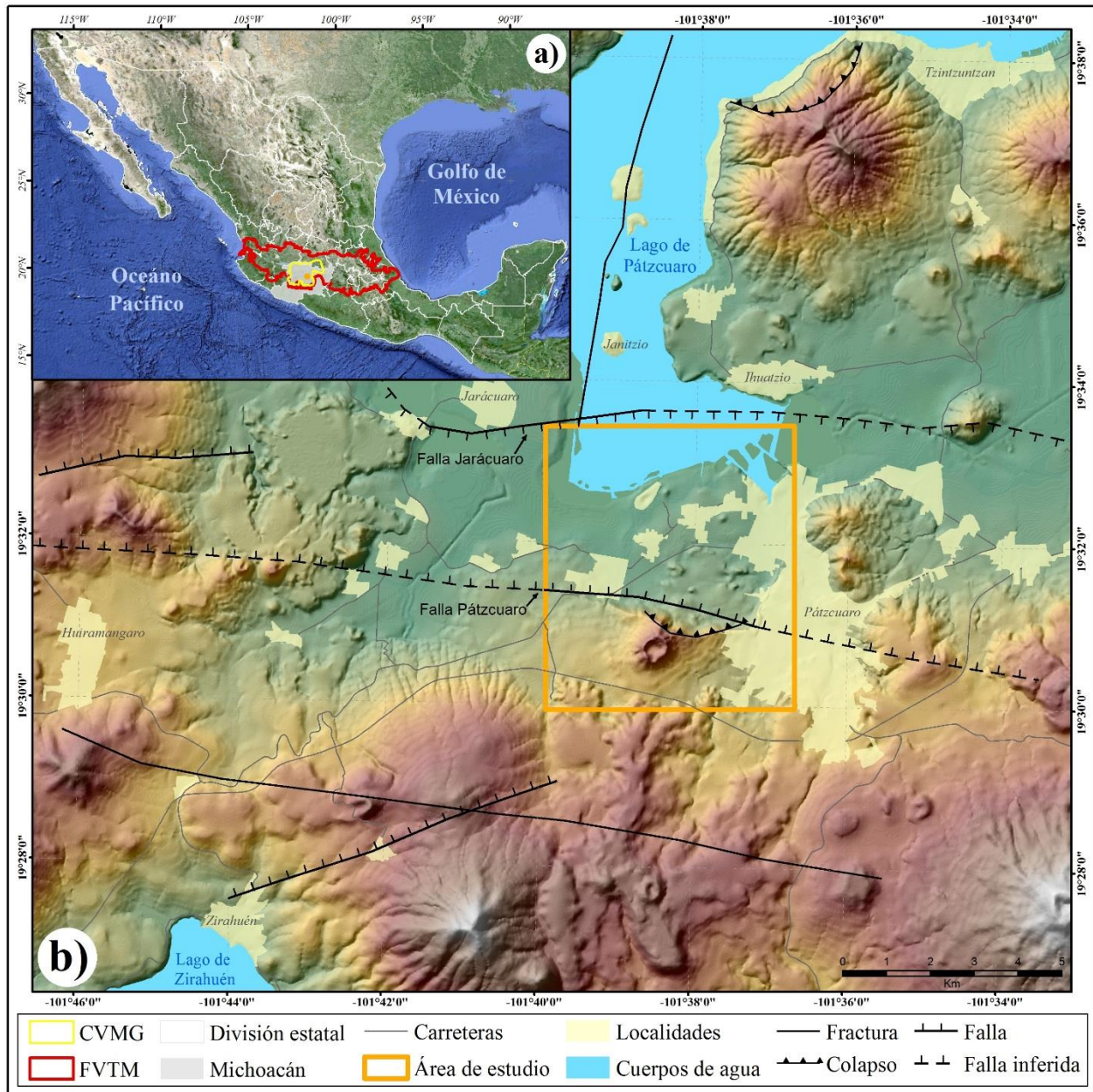


Figura 1: a) Localización de la zona de estudio dentro del CVMG y de la FVTM en la parte central de México. b) Ubicación de fallas y fracturas cercanas a la zona de estudio, asociadas al sistema de fallas Pátzcuaro–Acambay (Mendoza-Ponce *et al.*, 2018). Estructuras geológicas tomadas de Garduño-Monroy *et al.* (2009) y conjunto de datos vectoriales geológicos, escala 1:250,000, carta E14-1, producidos por INEGI (1983).

4.- MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Determinación de la Peligrosidad

El peligro de la zona está representado por la potencial ocurrencia de avalanchas de escombros, cuyos posibles escenarios fueron simulados en el programa Titan2D (GMFG, 2007). Se eligieron tres puntos del escarpe, uno para cada escenario de simulación, desde los cuales podría ocurrir una avalancha. La posición de esos puntos de salida consideró tres condiciones: a) alta pendiente en el escarpe, b) presencia de procesos gravitacionales menores identificados en campo, y c) disponibilidad de material para ser removido. En los tres escenarios de avalancha se usó un ángulo de fricción interna de 31° y un ángulo de fricción basal de 16°, los cuales fueron determinados mediante revisión bibliográfica. Para el caso del ángulo de fricción interna, se usaron los valores para lavas andesítico basálticas. La mayoría de los autores sugieren valores de 31 a 38° (Barton *et al.*, 1977; Capra *et al.*, 2008; Cortés *et al.*, 2010; Hoek *et al.*, 1981; Lukić, 2018; Sosio *et al.*, 2008) y solo un artículo (Hoek *et al.*, 1995) reporta un ángulo de 24° para masas rocosas de muy baja calidad (muy alteradas), por tanto, se usó un ángulo de fricción interna de 31°. Por otra parte, para el ángulo de fricción basal o coeficiente de fricción, autores como Sheridan *et al.* (2005), Sosio *et al.* (2008), Sosio *et al.* (2011) y Vázquez *et al.* (2019) recomiendan calibrar este valor hasta conseguir la distancia y espesor del depósito esperados, en este caso un ángulo de fricción basal de 16° cumplió con estos requisitos. Los demás parámetros se expresan en la siguiente tabla:

Cuadro 1: Parámetros de entrada en el programa Titan2D.

Avalancha	1	2	3	4	5	6
Este	224,342/2,159,938	124	880	214	0	36.68
Centro	223,063/2,160,047	197	723	297	0	66.44
Oeste	222,108/2,160,423	143	593	242	340	32.23

1= Coordenadas del punto de partida para la simulación de la avalancha (UTM, zona 13N). 2= Altura de la pila, en metros. 3= Longitud del eje mayor, en metros. 4= Longitud del eje menor, en metros. 5= Orientación del eje mayor. 6= Volumen calculado, expresado en millones de metros cúbicos.

El Modelo Digital del Terreno (MDT) usado como insumo para las simulaciones tiene resolución de 10 metros y fue elaborado a partir de los datos vectoriales escala 1:20,000, carta E14A22-D (INEGI, 2008). Los rangos usados para la peligrosidad por altura del depósito fueron determinados teniendo en consideración las afectaciones por espesor que pueden llegar a causar las avalanchas granulares secas, en concreto de 0 a 1 metros de altura del depósito se considera peligro muy bajo a bajo debido a que la probabilidad de que las personas pueden sobrevivir a este proceso es muy alta, al igual que la infraestructura, la cual se puede recuperar y rehabilitar sin afectaciones mayores. De 1.1 a 3 metros de altura del depósito se considera peligro bajo a moderado, ya que la probabilidad de que las personas puedan huir y salir con vida a un proceso de este nivel es menor que en el caso anterior, debido al enterramiento por material y a que aún se movería la avalancha con cierta velocidad; la infraestructura podría sufrir daños considerables. De 3.1 a 10 metros de altura en el depósito se considera peligro moderado a alto, considerando que difícilmente las personas podrían sobrevivir a un proceso de esta magnitud y perecerían por enterramiento y asfixia; la infraestructura también sufre daños graves por impacto, arrastre y enterramiento y difícilmente se puede recuperar. Finalmente, las alturas de depósito mayores a 10 metros se consideran de peligro alto a muy alto, ya que se estima que es casi imposible que las personas sobrevivan si se encuentran en este rango, al igual que la infraestructura se considera pérdida total. Esta clasificación se realizó porque en la bibliografía no se encontró alguna referencia que relacione el nivel de peligrosidad con la altura del depósito; el área de la cabecera de la avalancha también es considerada como de muy alto peligro debido al colapso y posterior removilización del material. En la figura 2 se muestran las áreas abarcadas por las avalanchas simuladas y sus respectivos espesores.

Para fines de evaluación del riesgo se emplearon los valores de peligro del mapa derivado de la unión de los tres escenarios, debido a que este representa la posibilidad de que ocurra cualquiera de estos escenarios, y por ende abarca la totalidad de territorio y elementos que estarían en situación de vulnerabilidad por exposición al peligro.

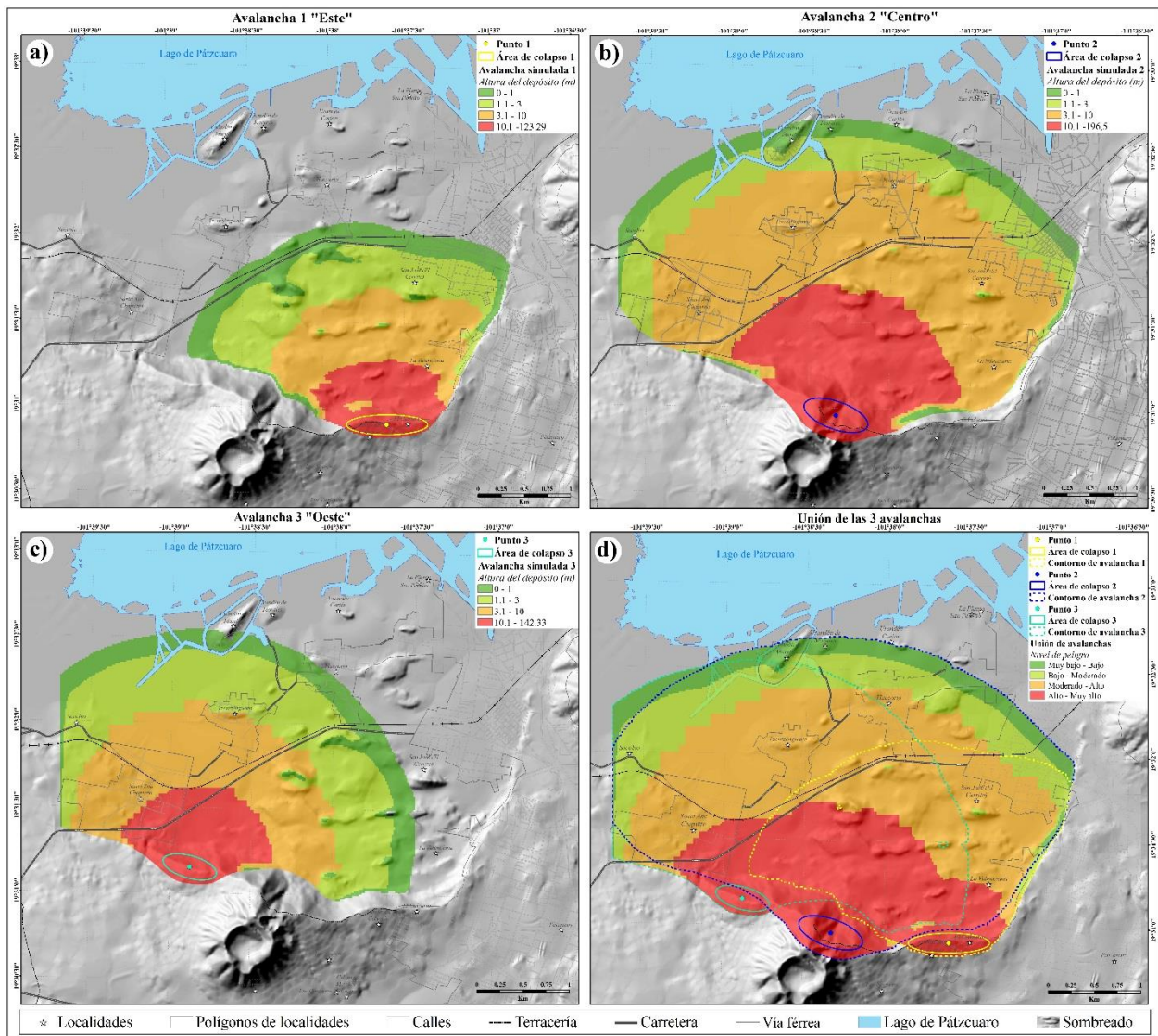


Figura 2: Mapas de niveles de peligro de acuerdo a las alturas de depósitos obtenidas con las simulaciones de avalanchas realizadas en Titan2D. a) Avalancha 1 “Este”. b) Avalancha 2 “Centro”. c) Avalancha 3 “Oeste”. d) Unión o mosaico de las diferentes zonas de peligro de las tres simulaciones anteriores, considerando el máximo valor de la altura del depósito en las celdas que se superponían. Este mapa compuesto fue usado para la evaluación del riesgo. La simbología de la parte inferior es general para los 4 mapas.

4.2 Análisis de la vulnerabilidad

El análisis de la vulnerabilidad se llevó a cabo mediante el uso del modelo SAVE (Spatial Analysis of the Vulnerability Environment) (Morales-Manilla, 2010) utilizando como insumos la información de la población contenida en el Censo de 2010 (INEGI, 2011) (tabla 2), encuestas entre la población y entrevistas a los líderes de las comunidades (figura 3).

Cuadro 2: Población total de las localidades de interés para este estudio

Localidad	Población total	Mayores de 18 años*	Encuestas aplicadas
San José (El Cerrito)	17	13	1
Santa Ana Chapitiro	1042	660	51
Tzentzenguaro	440	308	22
Huecorio	832	563	44
Urandén Carián	72	49	4
Isla Urandén Morales (Urandén Chico)	19	17	1
Urandén de Morelos (Isla Urandén de Morelos)	295	174	15
Colonias de Pátzcuaro -buffer 300 metros-	3388	2078	69
Total=	6105	3862*	207

Colonias de Pátzcuaro se refiere a los habitantes de la ciudad de Pátzcuaro que se asientan cercanos al escarpe de falla. *Dato usado para determinar el tamaño de muestra para la aplicación de las encuestas. Fuente: Censo de INEGI (2011).

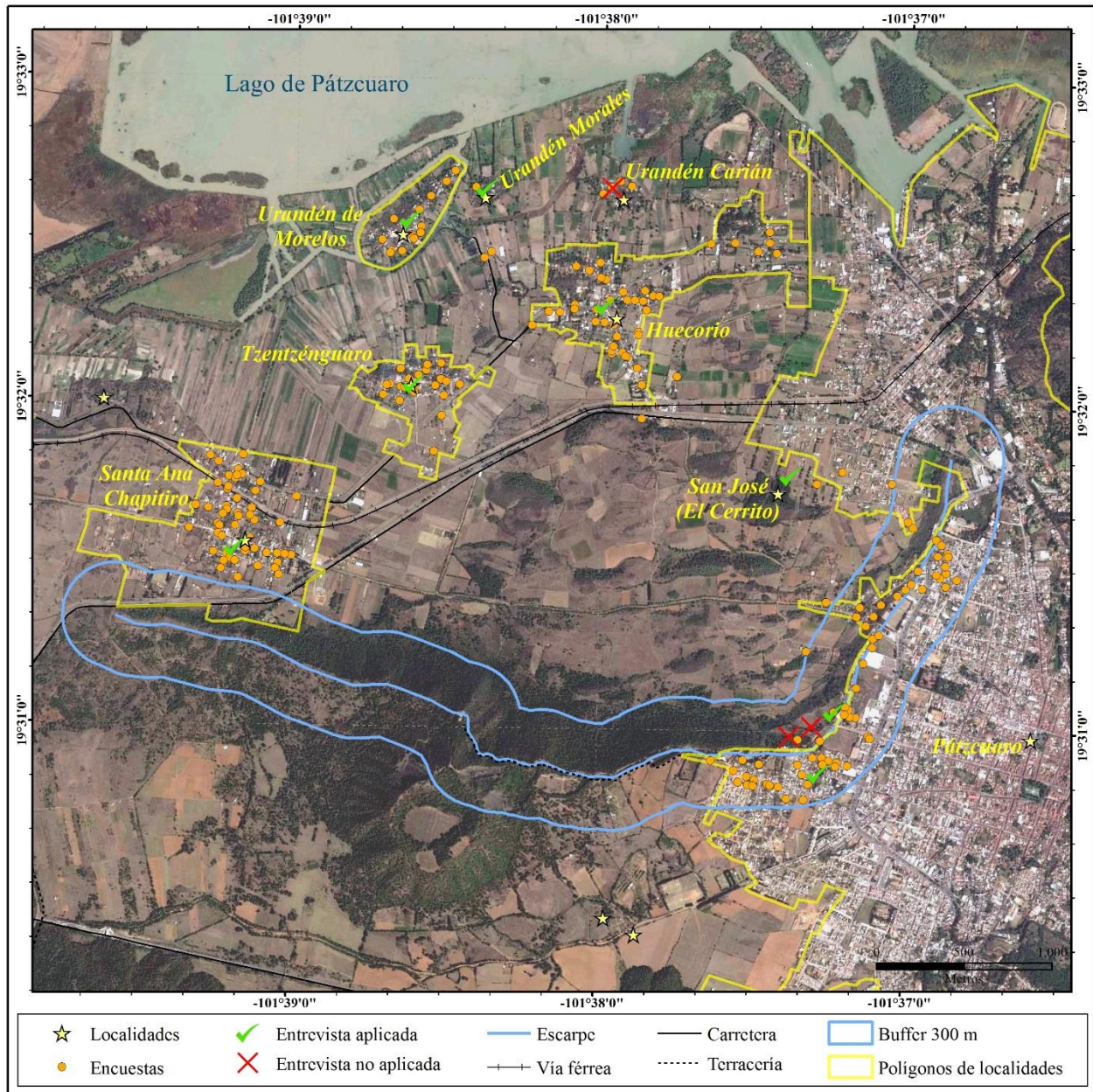


Figura 3: Ubicación de las localidades de interés. Se muestran los puntos donde fueron aplicadas las encuestas y las localidades donde se logró entrevistar al jefe de tenencia o líder de la comunidad. El buffer de 300 metros fue delimitado a partir de la línea azul (escarpe de la falla Pátzcuaro).

4.2.1 Encuestas

El objetivo de la aplicación de las encuestas fue evaluar la vulnerabilidad social y económica de la población, a su vez que se analizaba su percepción del riesgo. La encuesta se diseñó para ser aplicada a la población en general y consistió en leer a las personas una serie de preguntas cerradas

y abiertas, las cuales iban siendo respondidas a mano en un formato impreso (anexo 1) por las encuestadoras. La aplicación se realizó mediante visita aleatoria a las viviendas con las restricciones de que los encuestados fueran mayores de edad y que ese fuera su lugar de residencia al momento de contestar. Se aplicaron las encuestas en distintas fechas entre el 14 de agosto de 2015 y el 8 de febrero de 2016.

El tamaño de la muestra se determinó en base a los 3,862 habitantes mayores de edad del área de estudio (tabla 2), con un nivel de confianza del 95% y un intervalo de confianza de 6.63. De acuerdo a lo anterior, el tamaño de muestra fue de 207 encuestas, aplicadas en base al muestreo aleatorio simple (Onwuegbuzie *et al.*, 2007; Tamayo y Tamayo, 2003) pero tratando de aplicar las encuestas separadas una de otra, y no aglutinar resultados en el centro de la población.

4.2.2 Entrevistas a líderes de comunidades

Posterior a la aplicación de encuestas entre la población en general, se detectó la necesidad de entrevistar a los jefes de tenencia y líderes de las localidades, con la finalidad de conocer su experiencia en el manejo de contingencias en la comunidad, su percepción del riesgo, y las relaciones que pudieran existir con Protección Civil y el H. Ayuntamiento de Pátzcuaro. Estas entrevistas se llevaron a cabo mediante la aplicación de un cuestionario semiestructurado (el cuál fue diseñado en base a la encuesta y las necesidades de información detectadas) y las charlas fueron audiograbadas para después poder ser transcritas y analizadas. Se realizaron un total de 8 entrevistas (anexo 2). No se pudo realizar la entrevista con el encargado del orden de Urandén Carián, ya que no se logró localizar. Dos entrevistas que se tenían programadas en el asentamiento irregular del escarpe (figura 2), no se lograron llevar a cabo ya que las dirigentes de esas colonias fueron muy desconfiadas y no accedieron a brindar información, a pesar de que se les aseguró que

sus respuestas serían tratadas con toda confidencialidad y servirían únicamente para este trabajo de investigación.

4.2.3 Modelo SAVE

En zona de estudio se analizó la exposición, la sensibilidad y la resiliencia de la población, de la infraestructura, de las actividades económicas y de los recursos naturales, teniendo como base la información contenida en el Censo 2010 (INEGI, 2011), las encuestas, las entrevistas y los recorridos de campo.

Para las áreas rurales se usó la información por localidad, ya que no existe disponible por manzana. Para la localidad urbana de Pátzcuaro se analizó la información por manzana en el área cercana al escarpe de falla (la cual se delimitó con un buffer de 300 metros a partir de la línea del escarpe), como se muestra en la figura 3. Las variables que se consideraron para el análisis fueron: a) Cantidad de habitantes (por manzana y localidad), b) Personas menores de 15 años (por manzana y localidad), c) Personas mayores de 65 años (por manzana y localidad), d) Personas con derechohabencia a servicios de salud (por manzana y localidad), e) Niveles de marginación de la población (por Área GeoEstadística Básica -AGEB- y localidad). La información requerida para la evaluación de la vulnerabilidad de la infraestructura y el equipamiento fue obtenida de los datos vectoriales escala 1:20,000, clave de carta E14A22D INEGI (2008). La evaluación de la vulnerabilidad de las actividades económicas y de los recursos naturales, requirió de la elaboración de un mapa de uso de suelo (información poligonal) y se complementó con los datos puntuales del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), elaborado por el INEGI (2018). La información de las tablas fue procesada en Excel - Office 2013 y todos los mapas fueron realizados en el programa ArcMap 9.3.1 (ESRI, 2009).

4.3 Análisis ponderado del riesgo.

Las capas generadas anteriormente se convirtieron a un formato ráster, con una resolución de 2 metros y se procedió a hacer el cruce de cada una con la unión de los tres escenarios de avalancha (figura 2d). Los pesos en la ponderación fueron de 0.5 y 0.5%, excepto para las capas de infraestructura y equipamiento, para los cuales cada elemento tuvo un peso del 0.4 y el ráster de la avalancha 0.6, esto debido a que se creó una capa ráster para cada elemento y cada una de ellas sólo tenía un valor de vulnerabilidad asignado, por tanto cuando se realizaba un cruce con pesos iguales (0.5 y 0.5) en el producto obtenido no había diferenciación por peso de peligrosidad, en cambio, si se asigna 0.6 de peso a la peligrosidad, el producto obtenido si muestra distintos valores de acuerdo a la exposición (figura 8-a).

5.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Índice de vulnerabilidad.

En la figura 4 se muestran los elementos y componentes de la zona de estudio, sobre los cuales se realizaron los análisis de vulnerabilidad y riesgo.

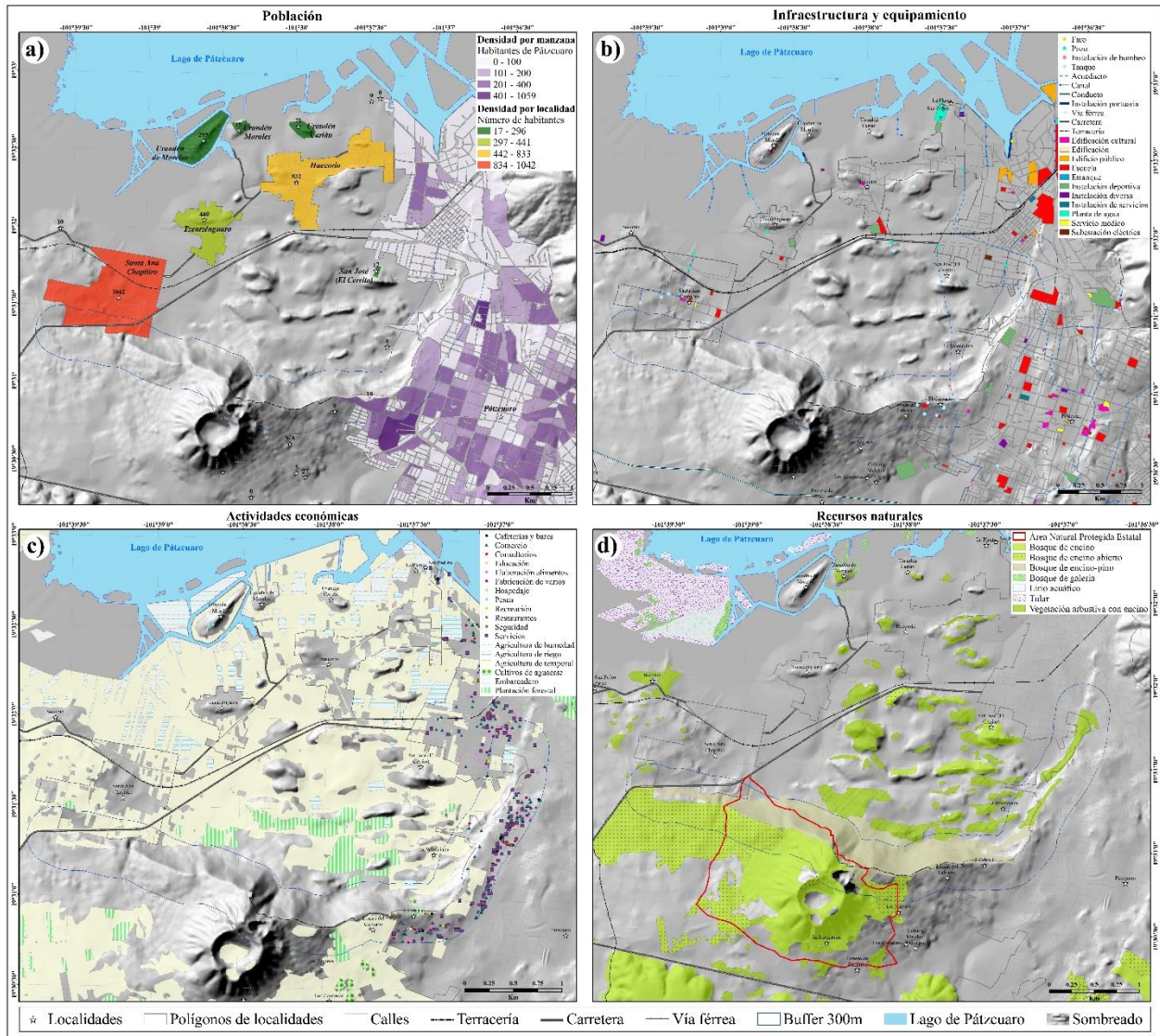


Figura 4: Elementos de la zona de estudio, la leyenda inferior es general y corresponde a los 4 mapas. Buffer 300m es el área de la ciudad de Pátzcuaro que es analizada en este trabajo. a) Población. Los números junto a las localidades indican la cantidad de habitantes, fuente: Censo Nacional de Población y Vivienda, INEGI (2011). b) Infraestructura y equipamiento del área de estudio. Fuente: Censo Nacional de Población y Vivienda, INEGI (2011). c) Actividades económicas respecto al uso de suelo. Ubicación puntual de unidades económicas, fuente: DENUE, INEGI (2018). d) Recursos naturales con respecto al uso de suelo. Polígono del Área Natural Protegida de categoría estatal, fuente: CONABIO (2016).

En este trabajo se consideró que la sensibilidad de la población frente al peligro es mayor para dos grupos de edades: las personas menores de 15 años (figura 5a) y los mayores de 65 años (figura 5b). En el caso de la vulnerabilidad por sensibilidad de la infraestructura y el equipamiento se

asignaron pesos considerando el servicio que prestan (y su función ante un posible evento catastrófico), y el costo estimado de restauración o reemplazamiento. Como se observa en la figura 5d, los colores rojos corresponden a la sensibilidad más alta y los colores verdes a una sensibilidad menor.

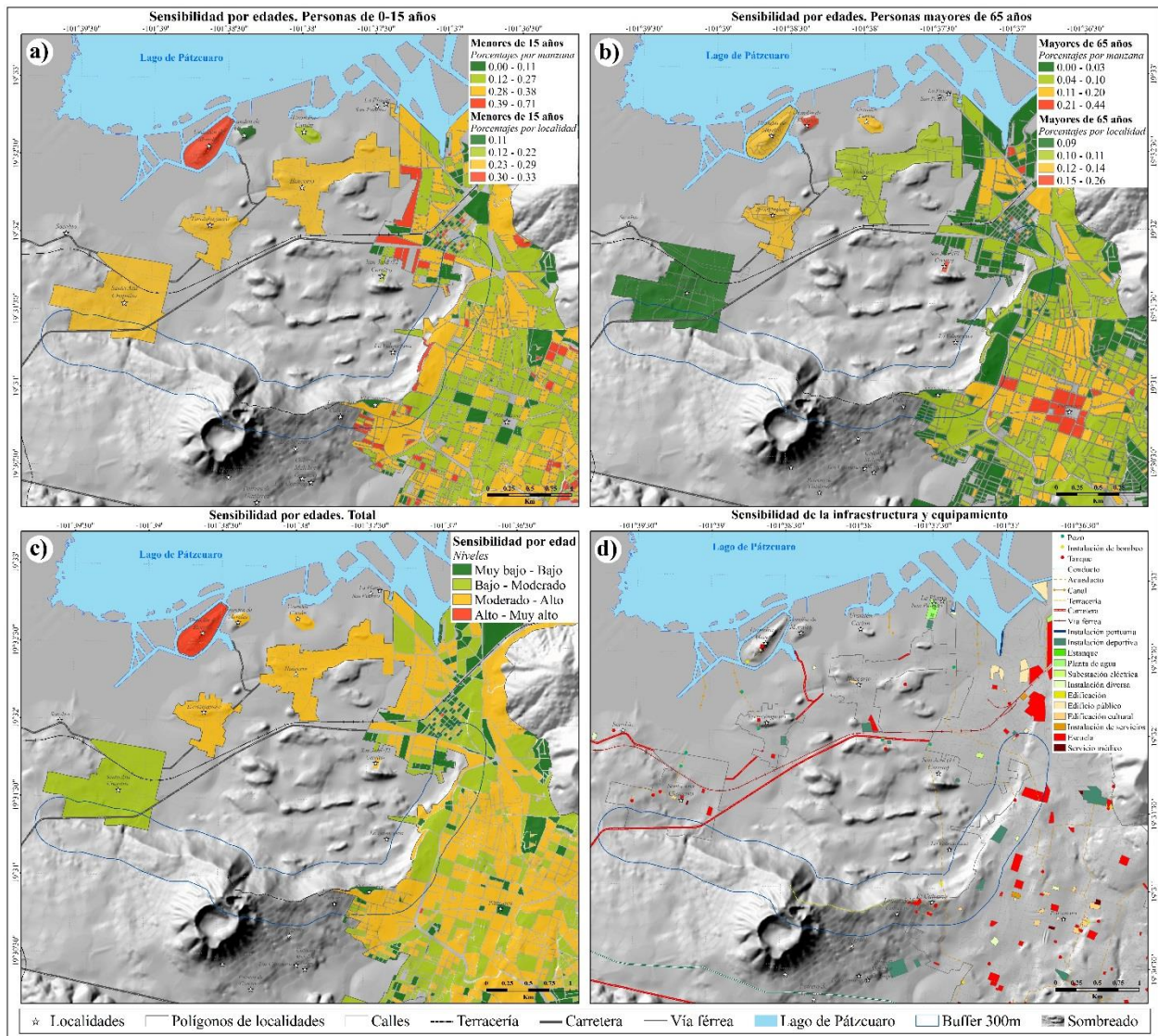


Figura 5: Vulnerabilidad por sensibilidad frente al peligro (grado de resistencia ante cualquier evento de peligro) de los componentes principales de este sistema; la leyenda inferior es general y corresponde a los 4 mapas. Buffer 300m es el área de la ciudad de Pátzcuaro que es analizado en este trabajo. a) Nivel de sensibilidad con respecto al porcentaje de personas menores de 15 años. b) Nivel de sensibilidad con respecto al porcentaje de personas mayores de 65 años. c) Nivel de sensibilidad de la población con respecto a los dos grupos de edades. d) Nivel de sensibilidad de la infraestructura y equipamiento del área de estudio.

La vulnerabilidad por sensibilidad de las actividades económicas que se muestra en la figura 6a se clasificó en 4 niveles en base al nivel de inversión económica que se requiere para poner en marcha esa actividad, por ejemplo, para los embarcaderos, la agricultura de temporal y de humedad, se le asignó un peso de 1 (menor costo de inversión), a la agricultura de riego se le dio un peso de 2, y el peso de 3 fue para las actividades forestales, de turismo y de cultivo de aguacate. Para las actividades económicas referidos como establecimientos económicos -DENUE (INEGI, 2018)-, se asignó un peso de 3 a los pequeños establecimientos, tiendas, talleres y oficinas de servicios; se les asignó un peso de 4 a los sitios de manufactura, tiendas de mayoreo, consultorios médicos, restaurantes grandes y servicios educativos.

La vulnerabilidad por sensibilidad de los recursos naturales, en este caso vegetación natural, se determinó en base a la calidad del recurso (figura 6b). La escala utilizada es de 4 rangos, en la cual el valor 1 correspondió al lirio acuático, valor 2 al tular, valor 3 al bosque de encino abierto, bosque de galería y vegetación arbustiva con encino, y un valor de 4 al bosque de encino y bosque de encino-pino.

La vulnerabilidad por resiliencia de la población en este trabajo se consideró desde el porcentaje de derechohabencia a servicios de salud con que cuenta la población, a menor porcentaje de cubrimiento, menos resiliente es la población (figura 6c). También se analizó la resiliencia de la población en base su nivel de marginación, ya que este índice evalúa las condiciones socioeconómicas de exclusión con base en el analfabetismo, población sin primaria completa, viviendas particulares habitadas sin excusado, viviendas particulares habitadas sin energía eléctrica, viviendas particulares habitadas sin disponibilidad de agua entubada, promedio de ocupantes por cuarto en viviendas particulares habitadas, viviendas particulares habitadas con

piso de tierra y viviendas particulares habitadas que no disponen de refrigerador (CONAPO, 2010 a;b); a mayor grado de marginación, menor es la resiliencia de la población (figura 6d).

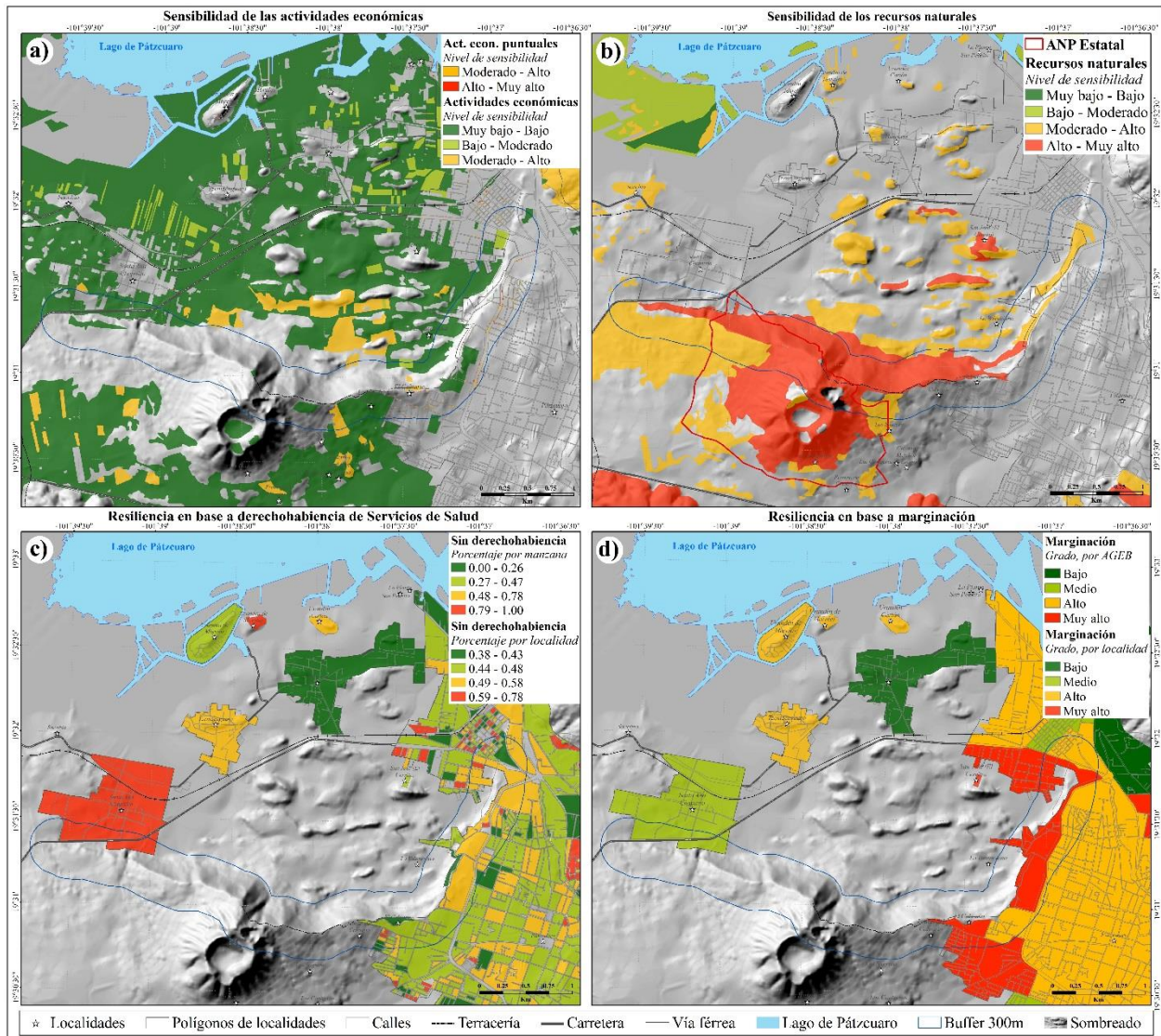


Figura 6: a) Vulnerabilidad por sensibilidad de las actividades económicas. Fuente de los datos puntuales: DENUE, INEGI (2018). b) Vulnerabilidad por sensibilidad de los recursos naturales. Fuente del polígono del Área Natural Protegida de categoría estatal: CONABIO (2016). c) Niveles de vulnerabilidad por resiliencia en base a la accesibilidad de la población a los servicios de salud. Fuente: INEGI (2011). d) Niveles de vulnerabilidad por resiliencia de la población en base a su nivel de marginación. Fuentes: Información por localidad: CONAPO (2010b). Información por AGEB urbana: CONAPO (2010a).

5.2 Índice de riesgo

Con la información analizada anteriormente en términos de peligro y vulnerabilidad, se elaboraron los mapas de riesgo, en los cuales se representan de manera individual cada una de las variables analizadas, para evitar la pérdida o sobreposición de valores. En la figura 7a se observa que la zona de mayor riesgo por exposición es la localidad de Santa Ana Chapitiro; esto debido a la cantidad de habitantes y a su cercanía al escarpe de falla. Si se considera que uno de los mayores factores de riesgo es la vulnerabilidad por sensibilidad por edades, el área de mayor riesgo son las manzanas de Pátzcuaro que se asientan en la porción superior adyacente al escarpe de falla en su sección oriental (figura 7b), y también debido a que el nivel de peligro es muy alto, ya que es una zona de colapso potencial, aunado a que se tiene un alto porcentaje de personas con mayor situación de vulnerabilidad a esta clase de eventos por su rango de edad (menores de 15 años y mayores de 65 años). El riesgo en donde el factor de vulnerabilidad por resiliencia con respecto a la situación de derechohabencia de la población tiene un papel importante, es igualmente alto para la zona de Santa Ana Chapitiro, y las manzanas cercanas al escarpe en la sección oriental, ya que el porcentaje de población con acceso a servicios de salud es bajo. Si se toma el factor de vulnerabilidad por resiliencia debida al nivel marginación, podemos apreciar que las zonas de mayor riesgo son las manzanas en la porción superior cercanas al escarpe de falla, esto debido a que el nivel de marginación de estas zonas es alto (figura 7d).

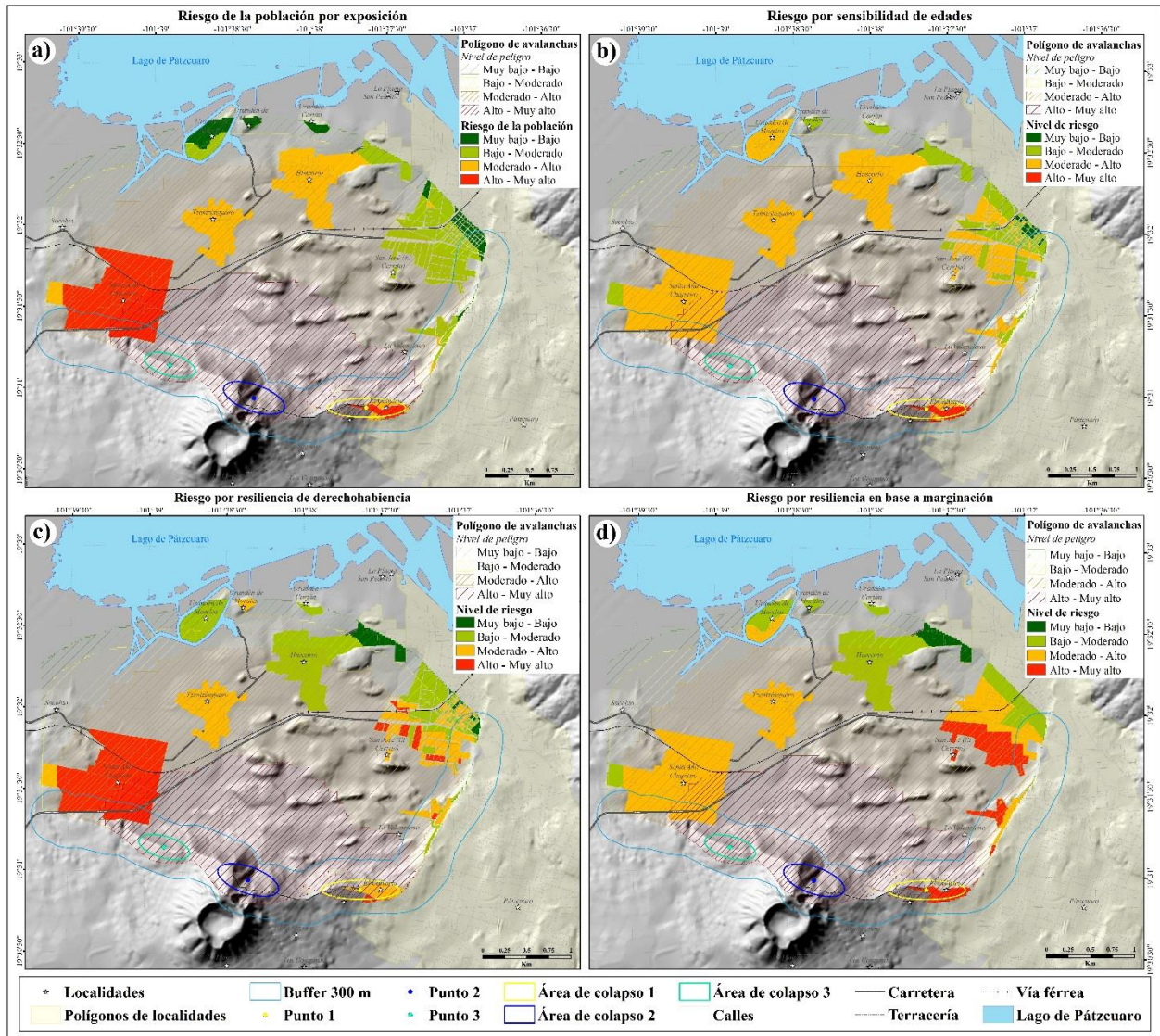


Figura 7: a) Riesgo ocasionado por la vulnerabilidad por exposición en base a la densidad de población. b) Riesgo debido a la vulnerabilidad por sensibilidad de la población en base a sus características de edad. c) Riesgo de la población en base a su vulnerabilidad por resiliencia por acceso a servicios de salud. d) Riesgo de la población en base a vulnerabilidad por resiliencia debida a sus condiciones de marginación.

El riesgo de la infraestructura y el equipamiento se muestra en la figura 8a, en la cual se observa que los segmentos de carretera, escuelas, servicios médicos y calles cercanos al escarpe, son los objetos que tienen mayor nivel de riesgo; en este caso, en el cruce de capas la avalancha tuvo un peso de 0.6 y la infraestructura y equipamiento un peso del 0.4; los tipos y pesos de los elementos originales se muestran en la figura 5d. En cuanto al riesgo de las actividades económicas que se

muestra en la figura 8b es, en su mayoría moderado a alto, determinado principalmente por su vulnerabilidad por exposición, y sólo algunos polígonos de agricultura de riego presentan un riesgo alto a muy alto. Para los recursos naturales (figura 8c), el nivel de riesgo es alto a muy alto en la zona cercana al escarpe, debido a la alta vulnerabilidad por exposición de los elementos que ahí se encuentran, sin mencionar la grave afectación que podría sufrir parte del ANP en caso del colapso de alguna parte del escarpe de falla.

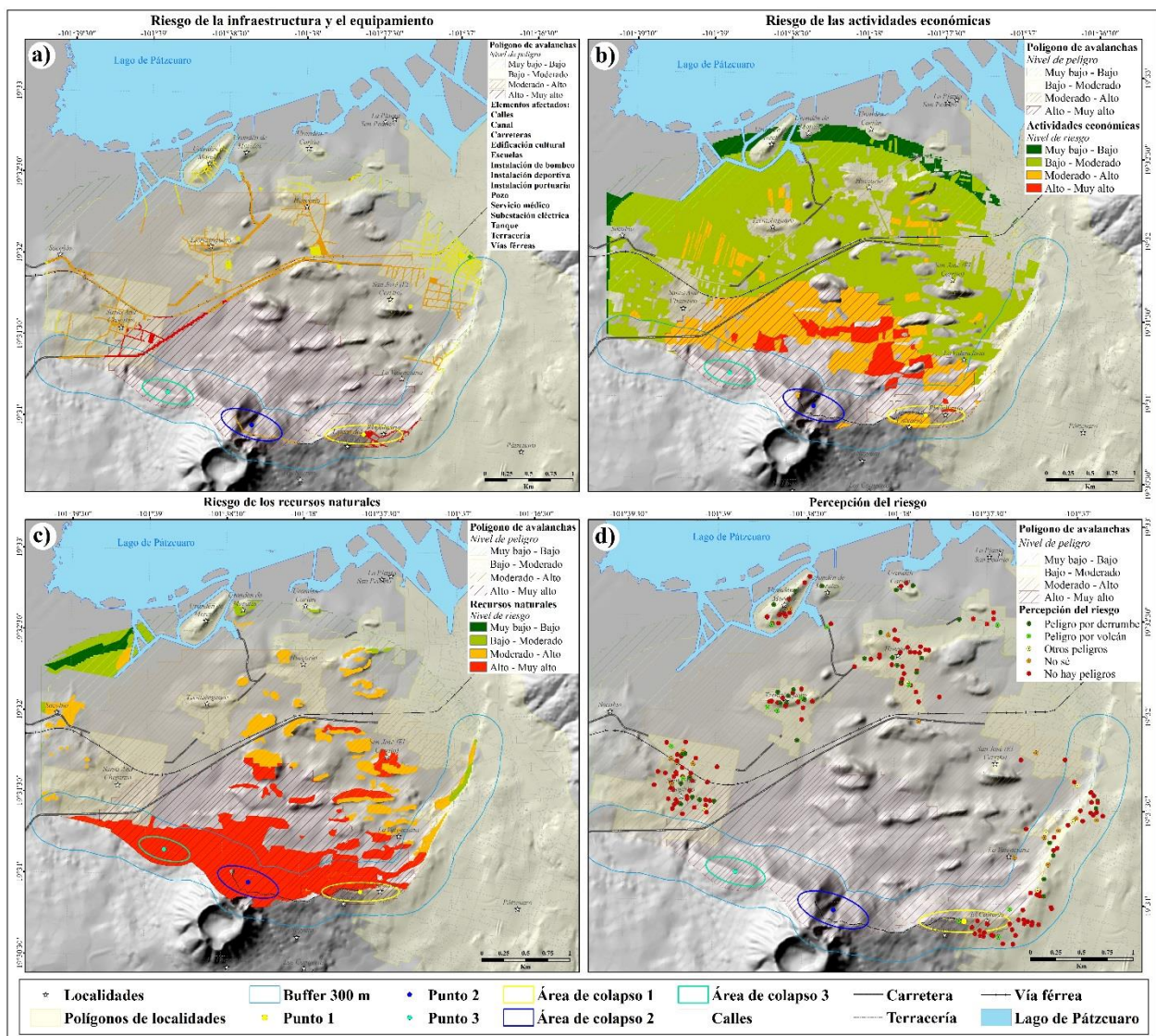


Figura 8: a) Riesgo de la infraestructura y el equipamiento en base a la vulnerabilidad por exposición y el nivel de vulnerabilidad por sensibilidad. b) Riesgo de las actividades económicas basado en la vulnerabilidad por exposición y el nivel de vulnerabilidad por sensibilidad. c) Riesgo de los recursos naturales en base a la vulnerabilidad por exposición y el nivel de vulnerabilidad por sensibilidad. d) Percepción del riesgo por parte de la población, de acuerdo a las respuestas de la encuesta aplicada en la zona de estudio.

La figura 8d muestra la distribución de la percepción del riesgo por parte de la población, la cual fue elaborada considerando las respuestas que la gente hizo ante la pregunta: “¿Considera que El Estribo representa algún tipo de peligro?”, donde los colores nos indican: Si, peligro por derrumbe (35 respuestas) – verde bandera-; Si, peligro por el volcán (12 respuestas) – verde limón-; Si, peligros humanos u otro tipo de peligros (6 respuestas) – amarillo; No sé si existan peligros (15 respuestas) – naranja; No existe peligro (139 respuestas) – rojo.

En lo que respecta a las entrevistas realizadas a los líderes de las comunidades, sólo 3 de ellos perciben que pudiera existir algún peligro relacionado con El Estribo (1 asocia el peligro a reactivación del volcán y 2 a derrumbes), los otros 5 consideran que no existe peligro, por la lejanía, o porque nunca se ha presentado algún fenómeno que represente un peligro para la comunidad. Sólo para la localidad de Santa Ana Chapitiro ha habido pláticas de Protección Civil, pero enfocadas a los casos de incendio o explosión de la gasera. Lo anterior deja ver que existe una escasa cultura de prevención, ya que la población desconoce los peligros y como actuar ante la ocurrencia de algún fenómeno.

Finalmente, se aprecia que el método de evaluación de la vulnerabilidad usado en este trabajo es completo e integral, teniendo en cuenta que otros trabajos sólo consideran el número de personas expuestas que pueden llegar a fallecer durante un evento natural (Peduzzi *et al.*, 2009), o las construcciones que podrían verse afectadas por distintos tipos de PRM (van Westen *et al.*, 2006); algunos trabajos metodológicos más recientes y completos (CENEPRED, 2014) sugieren

que el análisis de la exposición, fragilidad y resiliencia de los elementos sociales, económicos y ambientales, pero no han tomado en cuenta la percepción del riesgo. Existen otros trabajos muy detallados en cuanto a la vulnerabilidad física, como el propuesto por Frigo *et al.* (2012), quienes hacen una valoración estructural y arquitectónica de las viviendas expuestas a avalanchas de nieve, pero consideramos que un estudio a este nivel de detalle no es necesario para los análisis de vulnerabilidad de avalanchas de escombros, por la diferencia en el comportamiento mecánico de ambos fenómenos. Por otro lado, Kappes *et al.* (2012) analizan la vulnerabilidad física teniendo en cuenta la información específica de las construcciones, los alrededores de esas construcciones y las características de la población; sin embargo, no evalúan las características económicas y ambientales de las áreas expuestas, por lo cual consideramos que es una aproximación menos integral pero que podría complementar un estudio tan detallado como el que llevamos a cabo en este trabajo, sobre todo si se considera la aportación metodológica correspondiente a la evaluación de los alrededores de las áreas habitadas, donde estos autores evalúan la importancia de las barreras físicas naturales. Con base en lo anterior y como mencionan Fuchs *et al.* (2012), las interacciones entre el ambiente y la sociedad son muy complejas y cambiantes, por tanto, para lograr una evaluación adecuada del riesgo, el análisis de la vulnerabilidad debe ser amplio, multivariado e integral.

6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis del riesgo usado en el presente trabajo representa una metodología fácilmente replicable en México, ya que los insumos usados en el análisis de la vulnerabilidad son datos abiertos de fácil acceso, que pueden irse actualizando conforme a los censos de población. Los mapas presentados son de fácil interpretación, tanto para la población, como para los tomadores de decisiones y

autoridades encargadas de la seguridad y resguardo de las personas, con lo cual este trabajo puede contribuir en la construcción de un plan de mitigación y reducción del riesgo para el área de estudio.

La vulnerabilidad es el factor determinante en la presencia de los niveles de riesgo, y en el área de trabajo, la cantidad de habitantes y su nivel de marginación es crucial ya que hacen que el nivel de riesgo tenga valores altos. Por lo anterior, es imperativo evitar que se siga urbanizando cerca del escarpe de falla, y se recomienda que se amplíe el polígono del área natural protegida de categoría estatal que existe ahí, con lo cual se limita el uso de suelo a conservación.

Finalmente, se recomienda monitorear periódicamente el área del escarpe de falla con la finalidad de observar indicios que pudieran sugerir la ocurrencia de una avalancha de escombros o algún proceso de remoción en masa de magnitudes considerables. Esto en conjunto con la preparación de la población, para saber cómo actuar en caso de la ocurrencia de algún fenómeno perturbador.

AGRADECIMIENTOS

A Vianey Solorio Infante por su ayuda en aplicación de las encuestas. A los encuestados y entrevistados de las localidades, por su amable y desinteresada atención. Gemma Gómez agradece a CONACyT por la beca de doctorado. Manuel Mendoza agradece a CONACyT por los recursos del proyecto “Evaluación de la importancia relativa de bosque húmedo de niebla bajo un enfoque de paisaje” (0179386) y la beca sabática otorgada por PASPA-UNAM.

7.- REFERENCIAS

- Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of joints in theory and in practice. *Rock Mechanics*, 10, 1-65.
- Capra, L., Macías, J. L., Scott, K. M., Abrams, M., & Garduño Monroy, V. H. (2002). Debris avalanches and debris flows transformed from collapses in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico -

- behavior, and implications for hazard assessment. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 113, 81-110.
- Capra, L., Norini, G., Gropelli, G., Macías, J. L., & Arce, J. L. (2008). Volcanic hazard zonation of the Nevado de Toluca volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 176, 469–484.
- Centro Nacional de Estimación, P. y. R. d. R. d. D.-C. (2014). *Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales*. Lima, Perú.
- CONABIO (Cartographer). (2016). Áreas Naturales Protegidas Federales, Estatales, Municipales, Ejidales, Privadas y Certificadas de la República Mexicana. Escala: 1:1,000,000.
- CONAPO. (2010a). Índice de marginación por AGEB urbana 2000 - 2010. Consejo Nacional de Población, México. México, D. F.
- CONAPO. (2010b). Índice de marginación por localidad 1995 - 2010. Consejo Nacional de Población, México. México, D.F.
- Connor, C. B. (1987). Structure of the Michoacan-Guanajuato Volcanic Field, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33, 191-200.
- Cortés, A., Macías, J. L., Capra, L., & Garduño-Monroy, V. H. (2010). Sector collapse of the SW flank of Volcán de Colima, México The 3600 yr BP La Lumbre–Los Ganchos debris avalanche and associated debris flows. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 197, 52–66.
- ESRI. (2009). ArcGIS Desktop: Release 9.3.1. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. (Version 9.3.1).
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., & Manea, M. (2012). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *Tectonophysics*, 522-523, 122-149.
- Friego, B., De Biagi, V., & Chiaia, B. (2012). *Vulnerability assessment in avalanche hazardous areas*. Paper presented at the EGU General Assembly 2012.
- Fuchs, S., Birkmann, J., & Glade, T. (2012). Vulnerability assessment in natural hazard and risk analysis: current approaches and future challenges. *Natural Hazards*, 64(3), 1969–1975. doi: <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0352-9>
- Garduño-Monroy, V. H., Chávez-Hernández, J., Aguirre-González, J., Vázquez-Rosas, R., Mijares Arellano, H., Israde-Alcántara, I., Hernández-Madrigal, V. M., Rodríguez-Pascua, M. A., & Pérez López, R. (2009). Zonificación de los periodos naturales de oscilación superficial en la ciudad de Pátzcuaro, Mich., México, con base en microtemores y estudios de paleosismología. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26(3), 623-637.
- Garduño-Monroy, V. H., Soria-Caballero, D. C., Israde-Alcántara, I., Hernández-Madrigal, V. M., Rodríguez-Ramírez, A., Ostroumov, M., Rodríguez-Pascua, M. A., Chacon-Torres, A., & Mora-Chaparro, J. C. (2011). Evidence of tsunami events in the paleolimnological record of Lake Pátzcuaro, Michoacán, México. *Geofísica Internacional*, 50(2), 147-161.
- Garduño Monroy, V. H., & Macías, J. L. (2010). Peligros volcánicos del Estado de Michoacán. In C. d. d. C. y. T. d. C. E. d. C. y. T. d. Michoacán (Ed.), *Innovación es solución a mi alcance* (Vol. Cuaderno número 43).
- GMFG, G. M. F. G. (2007). Titan2D (Version 4.0) [Geoflow Simulator].
- Gobierno, S. d. (2016). *Reglamento de Protección civil del H. Ayuntamiento Constitucional de Pátzcuaro, Michoacán. Décima cuarta sesión ordinaria. Acta número 21. (CLXIV)*. Morelia, Michoacán.
- Hasenaka, T. (1994). Size, distribution, and magma output rate for shield volcanoes of the Michoacán-Guanajuato volcanic field, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 63, 13-31.
- Hasenaka, T., Ban, M., & Delgado Granados, H. (1994). Contrasting volcanism in the Michoacán-Guanajuato Volcanic Field, central Mexico: Shield volcanoes vs. cinder cones. *Geofísica Internacional*, 33(1), 125-138.

- Hasenaka, T., & Carmichael, I. S. E. (1985). The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, Central Mexico: Their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 105-124.
- Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). *Rock slope engineering* (3rd ed ed.). London: Institute of Mining and Metallurgy
- Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (1995). *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam, Netherlands: A.A.Balkema Publishers.
- INEGI (Cartographer). (1983). Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales E1401. Escala 1:250,000.
- INEGI (Cartographer). (2008). Conjunto de datos vectoriales de la cartografía topográfica escala 1: 20,000, clave E14A22D.
- INEGI. (2011). Censo de Población y Vivienda 2010. In R. definitivos (Ed.).
- INEGI. (2018). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE): Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI.
- Isradé-Alcántara, I., Garduño-Monroy, V. H., Fisher, C. T., Pollard, H. P., & Rodríguez-Pascua, M. A. (2005). Lake level change, climate, and the impact of natural events: the role of seismic and volcanic events in the formation of the Lake Patzcuaro Basin, Michoacan, Mexico. *Quaternary International*, 135, 35–46.
- Johnson, C. A., & Harrison, C. G. A. (1990). Neotectonics in central Mexico. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 64, 187-210.
- Kappes, M. S., Papatoma-Köhle, M., & Keiler, M. (2012). Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, 32, 577-590.
- Lukić, D. (2018). *Friction angle of soil and rock*. Paper presented at the 6th International Conference Contemporary achievements in civil engineering, Subotica, Serbia.
- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen conmemorativo del centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana, tomo LVII(3)*, 379-424.
- Mendoza-Ponce, A., Figueroa-Soto, A., Soria-Caballero, D. C., & Garduño-Monroy, V. H. (2018). Active faults sources for the Pátzcuaro–Acambay fault system (Mexico): fractal analysis of slip rates and magnitudes M estimated from fault length. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, 3121–3135.
- Morales-Manilla, L. M. (2010). *The definition of a minimum set of spatial relations*. (Tesis de Doctorado), Universidad Nacional Autonoma de México, Morelia, México.
- Newton, J. A., Metcalfe, S. E., Davies, S. J., Cook, G., Barker, P., & Telford, R. J. (2005). Late Quaternary volcanic record from lakes of Michoacán, central Mexico. *Quaternary Science Reviews*, 24(91–104).
- Onwuegbuzie, A. J., & Collins, K. M. (2007). A Typology of Mixed Methods Sampling Designs in Social Science Research. *The Qualitative Report*, 12(2), 281-316.
- Paz Tenorio, J. A., González Herrera, R., Gómez Ramírez, M., & Velasco Herrera, J. A. (2017). Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Investigaciones Geográficas*, 92(Abril), 1-16.
- Peduzzi, P., Dao, H., Herold, C., & Mouton, F. (2009). Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9, 1149–1159.
- Pola, A., Macías, J. L., Garduño-Monroy, V. H., Osorio-Ocampo, S., & Cardona-Melchor, S. (2014). Successive collapses of the El Estribo volcanic complex in the Pátzcuaro Lake, Michoacán, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 289, 41–50.
- Ponce-Pacheco, A. B., & Novelo-Casanova, D. A. (2018). Vulnerabilidad y Riesgo en el Valle de Chalco Solidaridad, Estado de México, Mexico. Caso de Estudio: El Triunfo, Avándaro and San Isidro. *Investigaciones Geográficas*, 97(Diciembre), 1-15. doi: dx.doi.org/10.14350/rig.59675

- Sheridan, M. F., Stinton, A. J., Patra, A., Pitman, E. B., Bauer, A., & Nichita, C. C. (2005). Evaluating Titan2D mass-flow model using the 1963 Little Tahoma Peak avalanches, Mount Rainier, Washington. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 139, 89–102.
- Sosio, R., Crosta, G., & Hungr, O. (2008). Complete dynamic modeling calibration for the Thurwieser rock avalanche (Italian Central Alps). *Engineering Geology*, 100(1-2), 11-26.
- Sosio, R., Crosta, G., & Hungr, O. (2011). Numerical modeling of debris avalanche propagation from collapse of volcanic edifices. *Landslides*, 9(3), 315-334. doi: 10.1007/s10346-011-0302-8
- Tamayo y Tamayo, M. (2003). *El Proceso de la Investigación Científica. Incluye evaluación y administración de proyectos de investigación* (Cuarta edición ed.). México.
- Turner II, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Corell, R. W., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A., & Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *PNAS*, 100(14), 8074-8079.
- UNDRO. (1980). Natural disasters and vulnerability analysis. Geneva, Switzerland: Report on the Expert Group Meeting, 9-12 July 1979.
- van Westen, C. J., van Asch, T. W. J., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167-184.
- Vázquez, R., Macías, J. L., Arce, J. L., Cisneros, G., & Saucedo, R. (2019). Numerical simulation of block-and-ash flows for different eruptive scenarios of the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 373, 36-50. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2019.01.026>
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., & Davis, I. (2003). *At Risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters* (Second edition ed.). Routledge, London.



CAPÍTULO VI:

CONCLUSIONES GENERALES

Tesis:
**Análisis del riesgo por procesos de remoción en masa
en ambientes volcánicos: El Estribo, Pátzcuaro,
Michoacán, México**



Capítulo VI. Conclusiones generales.

La evaluación del riesgo por procesos de remoción en masa para la zona de El Estribo, Pátzcuaro partió de una revisión bibliográfica general del fenómeno del vulcanismo y sus procesos de remoción en masa (PRM) asociados, a nivel mundial, sus impactos, los factores que los disparan, los efectos en los asentamientos humanos, las personas, y la infraestructura. La revisión es el marco teórico de este trabajo y permitió identificar que una de las áreas con más potencial de investigación a futuro es la política, manejo y gestión del riesgo. De acuerdo con la hipótesis general es posible concluir que esta sí se cumple, ya que se pudo comprobar que el entendimiento, análisis y modelación detallada de los peligros geológicos y geomorfológicos que existen en el área permite comprender de una manera más integral la interrelación y comportamiento con la vulnerabilidad y el riesgo, con lo cual se pueden reducir los daños a las personas, sus bienes y la infraestructura. Sin embargo, la percepción del riesgo por parte de las personas no está estrictamente determinada con la exposición al peligro en nuestra zona de trabajo.

El objetivo de esta tesis fue evaluar y modelar el riesgo desde una perspectiva geográfico-espacial por eventos geológicos asociados a ambientes volcánicos en El Estribo, lo cual fue cumplido mediante el uso de modelos conceptuales y herramientas muy valiosas como el mapa geomorfológico detallado, el cual ayudó a una mejor comprensión de los procesos endógenos y exógenos que ocurren y como se relacionan estos con los peligros geológicos. Con respecto a los objetivos específicos, se sintetizó la información geológica en el mapa de peligros y las simulaciones de avalanchas (capítulo IV), mientras que la información geomorfológica se plasmó en un mapa detallado. Se realizó una evaluación integral de los peligros del área y se simularon avalanchas de escombros para conocer el probable comportamiento y afectaciones de estos fenómenos, lo cual determinó los niveles de exposición y peligrosidad en el área.

Este es el primer estudio enfocado en el potencial de ocurrencia de avalanchas de escombros a partir de simulaciones, así como el análisis de la vulnerabilidad y el riesgo derivado de los PRM en este ambiente volcánico. Por lo anterior, este trabajo contribuye a la comprensión de la problemática existente en la zona y puede usarse como insumo para la elaboración de un plan de gestión y manejo integral del riesgo.

La revisión del estado del arte respecto al riesgo volcánico y sus peligros asociados permitió comprender el comportamiento y disparadores de los PRM en ambientes volcánicos, para entenderlos como peligro e insumo del riesgo. Por otro lado, el mapa geomorfológico detallado de la zona, realizado a partir de vuelos con drones y exhaustivo trabajo de campo, fue trascendental para la comprensión de los procesos exógenos y como se relacionan con los procesos endógenos en un área tectónicamente activa y el rol que juega la sociedad al respecto. La evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo, es la culminación palpable de esta tesis y en él se encuentran los mapas de riesgo con los cuales concluye este trabajo. En ese tenor, los mapas de riesgo han demostrado que el factor del peligro es inamovible e intrínseco de la zona, por tanto, para reducir el riesgo lo que corresponde es aminorar la vulnerabilidad de la población. La vulnerabilidad puede reducirse incrementando el número de personas con acceso a servicios de salud, disminuyendo el nivel de marginación de la población mediante la aplicación de programas sociales enfocados al desarrollo de las comunidades, pero sobre todo, la concientización de las personas respecto a los peligros y prepararlas para enfrentar situaciones de emergencia ante las amenazas a las que están expuestas.

Las encuestas aplicadas a la población y las entrevistas realizadas a los líderes de las comunidades fueron un material insustituible para el análisis y comprensión de los factores de vulnerabilidad, por que permitió un acercamiento a la población para conocer sus preocupaciones y percepciones con respecto al ambiente y con esto se logró obtener una perspectiva específica acerca de la situación de las personas en esta zona de peligro. Como expusimos en el capítulo V, se pudo apreciar que la gente tiene un nivel muy bajo de percepción del riesgo, esto debido principalmente a que no han vivido una contingencia en tiempo reciente, por tanto consideran inmutable lo que los rodea y esto los hace más vulnerables ante la ocurrencia de cualquier fenómeno dañino, por no estar informados ni preparados. En este sentido, se pudo estimar que el factor determinante para los altos niveles de riesgo en la zona son la cantidad de habitantes y su nivel de marginación. Por lo anterior, es imperativo evitar que se siga urbanizando cerca del escarpe de falla, y se recomienda que se amplíe el polígono del área natural protegida de categoría estatal que existe ahí, y con ello se limite el uso de suelo a conservación.

El uso de la metodología SAVE permitió realizar una evaluación integral de la vulnerabilidad, a la vez que los resultados desplegados en la cartografía evidencian el peso o valor que cada una de las variables tiene por separado, por tal motivo no se realizó un mapa de vulnerabilidad total, ya que al hacer el cruce de capas se tiende a desestimar o perder la información de cada uno de los elementos incluidos.

Finalmente, se recomienda realizar un monitoreo constante del escarpe de falla, donde se revisen los procesos gravitacionales que ocurren en las zonas cercanas, además de que es muy recomendable realizar fotogrametría con drones de manera regular, para obtener un escenario multitemporal donde también se pueda analizar la movilidad y expansión de la población y su dinámica con las zonas de peligro. También se recomienda llevar a cabo un estudio de paleosismicidad en la falla Pátzcuaro, con el objetivo de conocer su comportamiento, periodos de recurrencia y probable actividad a futuro, con lo cual se comprenderían mejor los peligros de la zona.



Anexo 1

No. _____

Encuesta para evaluar el nivel de Vulnerabilidad y Percepción del riesgo de los habitantes cercanos a El Estribo, Pátzcuaro, Michoacán



Fecha: _____ Hora inicia: _____ H. termina: _____

Coordenadas GPS: _____ / _____

Nombre: _____ **2-Edad:** _____ años. **3-Sexo:** (F) (M)

4-Dirección: _____ **5-Posición familiar:** _____

Patz. Colonias Sta. Ana Huecorio Tzents. Uran. Morel. Uran C. I. Uran. Moral. Cerrito

6-¿Nació usted en esta población? Si No Especifique _____

7-Años viviendo en esta población _____ **8-Años viviendo en esta casa** _____

9-¿Por qué motivo se mudó a esta casa? Me la dio un familiar Aquí nació Matrimonio
Pude comprar esta casa Cercanía a trabajo/estudio Era Casa prestada Vendí la casa anterior Reubicación Otro _____

10- Planea vivir aquí de manera: Tempora Definitiva No sabe

11-La casa es: Propia Rentada Prestada Hipotecada De un familiar Otra _____

12-De los siguientes bienes y servicios, ¿Con cuáles cuenta en su hogar?

<input type="checkbox"/>	Celular con internet	<input type="checkbox"/>	Refrigerador	<input type="checkbox"/>	Agua potable	<input type="checkbox"/>	Drenaje/alcantarillado
<input type="checkbox"/>	Celular sencillo	<input type="checkbox"/>	Estufa	<input type="checkbox"/>	Televisión de paga	<input type="checkbox"/>	Recolección de basura
<input type="checkbox"/>	Computadora	<input type="checkbox"/>	Lavadora	<input type="checkbox"/>	Servicio de teléfono	<input type="checkbox"/>	Transporte público
<input type="checkbox"/>	Televisor	<input type="checkbox"/>	Camas	<input type="checkbox"/>	Servicio de internet	<input type="checkbox"/>	Pavimento
<input type="checkbox"/>	Radio AM/FM	<input type="checkbox"/>	Energía eléctrica (luz)	<input type="checkbox"/>	Tanque de gas estacionario	<input type="checkbox"/>	Alumbrado público

13-¿Posee carro propio? No Si# _____ Auto Camioneta Pick-up Otro _____

14-¿Poseen ahorros en caso de una emergencia ante un peligro natural? No Si

15-Aparte de usted, ¿Cuántas personas viven en la casa? _____

16-¿Cuántos son niños (menores de 15 años)? _____

17-¿Cuántos son adultos mayores (más de 60 años)? _____

18-¿Cuántos están estudiando o terminaron la secundaria? _____

19-¿Cuántos trabajan fuera del hogar? _____

20-¿Cuántos aportan al ingreso familiar? _____

21-¿Algún miembro del hogar padece algún tipo de discapacidad? No Si ¿Cuántos? _____

22-¿De qué tipo? Auditiva Visual Motriz Psicomotriz Otra _____

23-¿Cuántos miembros de la vivienda tienen acceso a servicios de salud? _____

24-¿Con cuál institución? IMSS ISSSTE Seguro Popular Otro _____

25-¿Participa en alguna actividad, grupo o asociación vecinal que se relacione con la mejoría de las condiciones de su colonia, barrio o ciudad? No Si ¿Cuál? _____

26-¿Conoce usted a sus vecinos? Ninguno Algunos Muchos La mayoría Todos

27-¿Cree que está suficientemente enterado de los sucesos que ocurren en su localidad y los alrededores cercanos? Si No A veces No sé

28-¿Por cuál medio de comunicación se entera usted de las noticias? TV Radio Internet
Vecinos Jefe de tenencia Otro _____

29-¿Hace cuánto tiempo fue construida su casa (en su mayoría)? _____ años ____ meses No sé

30-¿Cuántos niveles tiene su casa? 1 2 3 4 Más de 4

31-¿De qué material están hechos los muros de su vivienda? Tabique Madera Concreto
Panel Block Lona/Cartón Adobe Otros _____

32-¿De qué material es el techo de su vivienda? Losa Lámina cartón Lámina metal
Tejamani Bóveda Palma/Paja Otros _____

33-¿De qué material está cubierto el piso de su vivienda (la planta baja, en caso de ser de más de 1 nivel)?
Cemento Tierra Mosaico Vitropiso Madera Laminado Otros _____

34-¿Qué profundidad tienen los cimientos de su casa? _____ metros No tiene No sé

35-¿Ha efectuado en el último año alguna obra de reparación de su vivienda? No Si _____
¿Por qué razón? _____

36-En el tiempo que tiene viviendo aquí, ¿Ha visto algún deterioro en su vivienda que haya sido causada por sismos, grietas o deslaves? No Si ¿Cuáles? _____

37-¿Considera que existe algún peligro natural en este lugar? No Si No sé
Inundación Deslizamiento Sismo Volcán Incendios
Plagas Volcanes de agua Otro _____

38-¿Sabe qué hacer en caso de algún siniestro o desastre? No Si No sé Depende

Inundación	Documentos importantes	Seguir instrucciones de autoridades	Ir a zona alta	Alejarse de corrientes de agua	No acercarse a postes de luz	Tener alimentos, radios, linternas
Sismo	Documentos importantes	Conservar la calma	Retirarse de objetos que puedan caer	Ponerse bajo las puertas y mesas	Salir rápido de la casa, a zona segura	Alejarse de postes, cables y tejados
Deslizamiento	Documentos importantes	Seguir instrucciones de autoridades	Emitir alarma	Alejarse de la zona, ponerse a salvo	Ubicar y ayudar a sobrevivientes	Revisar los daños sufridos en casas
Incendio	Documentos importantes	Tratar de apagarlo	Emitir alarma	Alejarse si hay peligro de explosión	Humedecer trapo, cubrir nariz y boca	Arrastrarse si el humo es denso
Volcán	Documentos importantes	Seguir instrucciones de autoridades	Alejarse de la zona, ponerse a salvo	Cubrirse para no respirar cenizas	Quitar cenizas de techos, tapar agua	Alejarse de las barrancas

Otros: _____

39-¿Cree usted que le pueda tocar vivir un sismo fuerte? Si No No sé

40-¿Cree usted que los sismos se sienten en su localidad con mayor intensidad que en otras partes (Pátzcuaro centro, por ejemplo)? No Si ¿Por qué? _____

41- Durante un sismo, ¿A qué le teme? No me da miedo A perder la vida Que se caiga la casa
Caída de cosas dentro de la casa Colapso de paredes y techos Hundimientos/grietas
Deslizamiento Otra _____

42- ¿Considera que El Estribo representa algún tipo de peligro? No Si No sé
¿Cuál, Porqué? _____

43- ¿Considera que ese peligro podría afectar su casa? No Si No sé
¿Porqué? _____

44- ¿Sabe usted si El Estribo ha sufrido desgajamientos anteriormente? No Si No sé

45- ¿Ha observado alguna de las siguientes situaciones en la ladera (escarpe de falla) del Estribo? No
Grietas Árboles inclinados Caída de rocas Desgajamientos pequeños Manantiales
nuevos Abultamientos (abombamientos) Cercas desalineadas Otros _____

46- Ante un peligro inminente ¿En cuál de los siguientes casos estaría dispuesto a evacuar su casa?
Aviso de las autoridades Ver que tendré afectación directa La casa está parcialmente destruida
La casa está totalmente destruida No evacuaría Otra _____

47- ¿Conoce rutas de evacuación rápidas en caso de un desgajamiento repentino? No Si No sé
¿Cuál? _____

48- ¿Cuáles son las condiciones de la carretera más cercana a usted en caso de evacuación?
Buenas Regulares Malas Depende de la temporada No sé

49- Si ocurriera un desastre y usted y su familia ya estuvieran a salvo, ¿Qué le preocuparía posteriormente?
Recuperar mis bienes Las demás personas Robo/Rapiña Documentos olvidados
Dónde voy a vivir Animales de granja Tierras de trabajo Cómo mantener a la familia
Otra _____

Anotaciones: _____

Nivel de ingresos familiares mensuales (estimado):

Pobreza extrema (<\$3,350) Bajo (\$3,351-\$6,800) Medio bajo (\$6,801-\$10,100)
Medio (\$10,100-\$35,000) Alto (\$35,001-85,000) Muy alto (>\$80,000)

¡Muchas gracias!