



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

LICENCIATURA EN GEOCIENCIAS

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
Unidad Morelia

*Zonación de los movimientos en masa en la
cuenca Huahua, Sierra-Costa de Michoacán*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
LICENCIADA EN GEOCIENCIAS

PRESENTA:

Lilia Lizbeth Bastida Ortiz

DIRECTORES DE TESIS:

Dra. Berenice Solís Castillo

Dr. Gabriel Vázquez Castro



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.



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

MTRA. IVONNE RAMÍREZ WENCE

DIRECTORA

DIRECCIÓN GENERAL DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR

PRESENTE

Por medio de la presente me permito informar a usted que en la **sesión ordinaria 08** del **Comité Académico** de la Licenciatura en Geociencias de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) Unidad Morelia celebrada el día **11 de septiembre del 2019**, acordó poner a su consideración el siguiente jurado para la presentación del Trabajo Profesional del alumno (a) **Lilia Lizbeth Bastida Ortiz** de la Licenciatura en **Geociencias**, con número de cuenta **416052123**, con la tesis titulada: **"Zonación de los movimientos en masa en la cuenca Huahua, Sierra-Costa de Michoacán"**, bajo la dirección como **tutora** de la Dra. Berenice Solís Castillo, y como **co-tutor** el Dr. Gabriel Vázquez Castro.

El jurado queda integrado de la siguiente manera:

Presidente:	Dr. Gerardo Bocco Verdinelli
Vocal:	M. en C. Juan Antonio Navarrete Pacheco
Secretario:	Dr. Gabriel Vázquez Castro
Suplente 1:	Dr. Pedro Corona Chávez
Suplente 2:	M. en C. Felipe García Tenorio

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Morelia, Michoacán a 03 de agosto del 2020.

DRA. YESENIA ARREDONDO LEÓN
SECRETARIA GENERAL

CAMPUS MORELIA

Apartado Postal 27-3 (Santa Ma. De Guido), 58090, Morelia, Michoacán
Antigua Carretera a Pátzcuaro N° 8701, Col. Ex Hacienda de San José de la Huerta
58190, Morelia, Michoacán, México. Tel: (443)689.3500 y (55)56.23.73.00, Extensión Red UNAM: 80614
www.enesmorelia.unam.mx

AGRADECIMIENTOS INSTITUCIONALES

A la Escuela Nacional de Estudios Superiores (**ENES**) **Unidad Morelia** por abrirme las puertas, logrando así, mi formación profesional en sus instalaciones y con su personal académico.

Al proyecto **PAPIIT IN300819** titulado: Vulnerabilidad y adaptación de pequeñas localidades indígenas frente a peligros hidro-meteorológicos. Casos en la Sierra-Costa de Michoacán y en la Mixteca Alta de Oaxaca, por el apoyo financiero en el desarrollo de esta investigación, así como también por la beca otorgada para la conclusión de la tesis.

Al **Laboratorio de Petrografía** del Instituto de Geofísica Unidad Michoacán (IGUM) por facilitarme los equipos para elaboración de las láminas delgadas de roca.

Al **Laboratorio de Geociencias** de la ENES Unidad Morelia por facilitarme los equipos para la descripción de las láminas delgadas de roca.

Al M. C. Silvestre Cardona Melchor por permitirme el acceso a la **Sala de Microscopios** del IGUM para la toma de fotografías de las láminas delgadas.

A la **Universidad EAFIT** (Escuela de Administración, Finanzas e Instituto Tecnológico) de Colombia por permitirme realizar una estancia de investigación en sus instalaciones, en especial un agradecimiento merecido en su totalidad al **Mtro. Marco Fidel Gamboa Ramírez** y su equipo de trabajo (Sandra, Milena y Luis) por recibirme con la mejor disposición y sobre todo por haberme ayudado a desarrollar la parte central de mi trabajo de tesis, sin él hubiese sido mucho más difícil concluir este trabajo.

Al honorable **comité sinodal**: Dr. Pedro Corona Chávez, M.C. Felipe García Tenorio, M. C. Juan Antonio Navarrete Pacheco, Dr. Gabriel Vázquez Castro y Dr. Gerardo Bocco Verdinelli por contribuir en la mejora de ese trabajo, agradezco el tiempo dedicado y sus enriquecedoras observaciones.

A mis asesores el **Dr. Gabriel Vázquez Castro** y la **Dra. Berenice Solís Castillo**, por su apoyo en la elaboración de este trabajo, gracias por brindarme su confianza para participar en esta investigación.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A los hermanos Gómez: **Julio** por estar conmigo desde el tercer semestre de la carrera, gracias por siempre resolver las dudas más simples o complejas que tuve, te convertiste en mi Geólogo personal hasta la conclusión de este gran logro que comparto contigo; **Luz** por brindarme tu amistad durante toda la licenciatura y **Francisco Javier** por revisar y sugerir valiosas modificaciones a mi trabajo para enriquecerlo.

Al **M. C. Neftalí Razo Pérez** por aconsejarme durante toda la Licenciatura, gracias por escucharme y apoyarme en este largo camino, usted muchas veces logró que no me rindiera y supo cómo guiarme para concluir mi carrera. Sin duda es un tutor estudiantil ejemplar, gracias por eso profesor.

A mis compañeros: **Luz, Salvador y David**, quienes me apoyaron en el trabajo de campo.

DEDICATORIA

*A mi madre **Anastacia**, porque a ella le debo este gran logro en mi vida. Infinitas ¡Gracias! Mami por apoyarme en cada momento que lo necesité, por recordarme que siempre cuento contigo y por confiar en mí.*

Con todo mi amor para ti mamá, recuerda que este logro no es sólo mío, también es tuyo porque gracias a tu apoyo, consejos y la educación que me diste concluí esta etapa de mi vida.

*También para mis hermanas **Yaneth, Carmen** y **Anahí** que me apoyaron económicamente, con sonrisas, palabras de motivación, comprensión, cariño y momentos hermosos que me motivaron a concluir lo que había empezado.*

A toda mi familia por confiar en mí y brindarme su apoyo en este logro.

RESUMEN

El propósito principal de este estudio fue generar un mapa que muestra la zonificación de la susceptibilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa (PRM) en la cuenca del río Huahua, ubicada en la región Sierra-Costa de Michoacán, a partir de análisis estadísticos bivariados. Adicionalmente se generó un inventario de PRM, un mapa geológico y mapas morfométricos para el área de estudio.

Se aplicaron dos métodos estadísticos bivariados: Pesos de Evidencia (WofE) y Radio de Frecuencia (FR), considerando dos muestras aleatorias, obteniéndose un total de seis mapas para deslizamientos y seis para flujos. La validación de cada mapa se realizó con PRM que no fueron utilizados para el análisis de susceptibilidad; de esta validación se encontró que para los deslizamientos (muestra 1), los modelos W+, Cw y FR muestran una precisión de predicción de 80%, mientras que para los mapas de flujos (muestra 2) la precisión de predicción fue 93% para W+ y FR y 80% para Cw.

Al aplicar estas metodologías se logró determinar que los factores que más influyen en la ocurrencia de movimientos en masa son: la litología (calizas), curvaturas de la ladera convexa, relieves relativos de 200 a 300 m, distancias menores que 40 m a caminos y distancia a lineamientos menores a 350 m. Con base en los resultados del área bajo la curva de éxito, la concentración de movimientos en masa en un menor porcentaje de área, el resultado de la validación y la distribución espacial de la susceptibilidad en los mapas, se considera que el modelo más acertado y coherente para la zonificación de lugares susceptibles a ocurrencia de movimientos en masa, tipo deslizamientos y flujos en la cuenca de Huahua es el de FR.

ABSTRACT

The main purpose of this study was to generate a map showing the susceptibility zoning on occurrence of mass movement processes (PRM) in the Huahua river basin, at Sierra-Costa de Michoacán region, from bivariate statistical analysis. Additionally was generated a PRM inventory, a geological map and morphometric maps for the study area.

Two statistical bivariate methods were applied: Weights of Evidence (WofE) and Frequency Ratio (FR), considering two random samples, and obtaining a total of six maps for landslides and six for flows. Each map validation was performed with PRM not used with susceptibility analysis; from this validation was found for landslides (sample 1), a prediction accuracy of 80% in the W+, Cw and FR models, while for the flow maps (sample 2) prediction accuracy was 93% for W+ and FR and 80% for Cw.

The aforementioned methods implementation, succeed to the most influence factors occurring on mass movements are: the litology (limestones), the convex slope curvature, relative reliefs of 200 to 300 m, less than 40 m distance to roads and lineaments distance less than 350 m. On the basis of the results of the area under the success curve, the concentration of mass movements in a smaller area percentage, the validation result and the spatial distribution of the susceptibility in the maps, it is considered that the most accurate and coherent model for the zoning of susceptible places to the occurrence of mas movements, landslide type and flow in the Huahua basin is of FR.

Índice

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	3
1.1.1. Movimientos en masa en México	3
1.1.2. Estudios de inventarios de PRM	3
1.1.3. Mapas de susceptibilidad por movimientos en masa	5
1.2. Justificación	8
1.3. Problemas de Investigación	8
1.4. Objetivo general	9
1.4.1. Objetivos específicos	9
Capítulo 2. Zona de estudio	10
2.1. Localización y vías de acceso	10
2.2. Relieve	11
2.3. Geología	14
2.3.1. Marco geológico-tectónico regional	14
2.3.2. Estratigrafía	15
2.4. Clima	24
2.5. Suelos	26
2.6. Hidrología	27
2.7. Cobertura vegetal y uso de suelo	28
2.8. Sistema socio-demográfico y socio-económico	30
2.8.1. Aquila	30
2.8.2. Coalcomán de Vázquez Pallares	43
Capítulo 3. Metodología	55
3.1. Actividades preliminares	55
3.2. Elaboración de mapa geológico	56
3.2.1. Trabajo de gabinete	56
3.2.2. Trabajo de campo	57
3.2.3. Trabajo de laboratorio	58
3.3. Preparación de insumos y modelado	59

3.3.1. Inventario de PRM	59
3.3.2. Preparación de factores condicionantes	61
3.3.3. Métodos estadísticos bivariados	67
3.3.4. Curva de éxito	75
3.3.5. Categorías de susceptibilidad	76
3.3.6. Validación de modelos	77
Capítulo 4. Resultados	78
4.1. Mapa geológico	78
4.2. Inventario de PRM	87
4.3. Factores condicionantes	88
4.3.1. Distancia entre lineamientos	88
4.3.2. Suelos	89
4.3.3. Uso de suelo y vegetación	90
4.3.4. Pendientes	91
4.3.5. Relieve relativo	92
4.3.6. Orientación de la ladera	93
4.3.7. Curvatura	94
4.3.8. Distancia a drenaje	95
4.3.9. Distancia a vías	96
4.3.10. Geología	97
4.4. Modelos de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento	99
4.4.1. Modelo W^+	103
4.4.2. Modelo Cw	105
4.4.3. Modelo FR	106
4.5. Modelos de susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujo	108
4.5.1. Modelo W^+	113
4.5.2. Modelo Cw	115
4.5.3. Modelo FR	116
4.6. Validación de modelos de susceptibilidad	118
Discusiones	121

Conclusiones	125
Bibliografía	127
Anexo 1. Movimientos en masa	139
Anexo 2. Ajuste de datos	146

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Abordar la zonificación de los movimientos en masa desde un enfoque regional nos permite visualizar de manera general, el peligro al que se enfrenta la población que habita en esa zona ante los procesos de remoción en masa (PRM). Además, se pueden estudiar otros desastres desencadenados por la ocurrencia de estos peligros, como pueden ser las presas naturales causadas por el depósito del material desprendido de un PRM en el cauce de un río. Un ejemplo claro de esto es el deslizamiento de ladera de noviembre 2007 en el río Grijalva, Chiapas, México, donde 48 millones de metros cúbicos de roca y suelo interrumpieron el flujo del río provocando que la localidad de San Juan de Grijalva, ubicada en la margen derecha del río, fuera afectada por el movimiento en masa del terreno y por la inundación repentina de una gran ola, producto del deslizamiento, lo que resultó en la muerte de 25 de sus habitantes (Hinojosa-Corona *et al.*, 2011).

Además de lo anterior, hacer un análisis a escala regional nos permite priorizar escenarios para la toma de decisiones rápidas y sobre todo para la generación de planes de ordenamiento territorial.

De acuerdo con Ferrer (1995) los movimientos de ladera están controlados por una serie de factores que, en una primera aproximación, pueden quedar agrupados en factores condicionantes y factores desencadenantes. Los primeros están unidos a la propia naturaleza, composición, estructura y forma del terreno, mientras que los factores desencadenantes pueden ser considerados como factores “externos” que al actuar sobre las laderas provocan o desencadenan su inestabilidad al modificar las condiciones preexistentes.

En la mayoría de los casos, las causas naturales que disparan o activan los deslizamientos son las lluvias intensas y prolongadas, los sismos fuertes y la actividad volcánica, o la combinación de ellas (Hinojosa-Corona *et al.*, 2011).

Uno de los factores condicionantes de los PRM son las unidades geológicas y preexistencia de fallas y lineamientos, por lo que el análisis de estos factores es de mucha utilidad para conocer la susceptibilidad de movimientos en masa de un lugar. Es por esto que en este trabajo se pretende la elaboración de un mapa geológico que además de aportar nueva información en el área de estudio, ayudará, junto con otros insumos, a la zonificación de los

PRM en la cuenca del río Huahua mediante los métodos estadísticos bivariados: Pesos de Evidencia y Radio de Frecuencia; es decir, pretendemos responder a la pregunta ¿Cuál es el grado de susceptibilidad a PRM en la cuenca del río Huahua, considerando los factores condicionantes del área de estudio?

Finalmente, al contar con la información de zonificación de los PRM en el área de estudio, podrá ser utilizada para futuras planeaciones de ordenamiento territorial con la finalidad de evitar afectaciones de la infraestructura y pérdidas de vidas en la región.

1.1. Antecedentes

1.1.1. Movimientos en masa en México

México es un país cuyo territorio está conformado en dos terceras partes por sistemas montañosos, en los cuales se conjugan una serie de factores geológicos, geomorfológicos, estructurales y climáticos, que definen zonas de marcada inestabilidad en las cuales desafortunadamente, existen desarrollos urbanos y rurales, así como de infraestructura civil. Esto evidentemente coloca a un gran número de habitantes, inmuebles y estructuras en una situación de riesgo potencial ante la generación de deslizamientos y derrumbes de roca, flujos de lodos y/o detritos, así como otros procesos destructivos asociados a zonas montañosas (Jaimes *et al.*, 2010).

De 1970 a 2013 en Chiapas, Ciudad de México, Estado de México, Guerrero, Hidalgo, Oaxaca, Puebla y Veracruz han sido reportados entre 100 y 200 movimientos en masa en cada uno (registro en DesInventar, sistema de inventarios o registro de información sobre características y efectos de diversos tipos de desastres, el cual fue generado y es alimentado por la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina). Esto nos habla de que nuestro territorio continuamente está amenazado por estos procesos.

Una de las principales clasificaciones de movimientos en masa se muestra en el anexo 1.

1.1.2. Estudios de inventarios de PRM

Los procesos de remoción en masa se pueden presentar sobre la superficie terrestre en diversas escalas, lugares, condiciones geológicas, geomorfológicas, climáticas e inclusive sociales (Alcántara y Murillo, 2007). La construcción de un inventario de movimientos en masa consiste en sistematizar esta información.

Alcántara y Murillo (2007), proponen que un inventario de este tipo se puede definir como la relación ordenada de la ocurrencia y características de los procesos de remoción en masa en un territorio determinado, y durante un periodo específico, el cual debe permanecer actualizado detalladamente (Alcántara y Murillo, 2007).

En América Latina existe un sistema de inventarios llamado DesInventar, que registra las características y efectos de la ocurrencia de pequeños, medianos y grandes desastres. Entre

estos desastres están incluidos los relacionados con los procesos de remoción en masa. En México el inventario se ha construido y actualizado de manera continua bajo la responsabilidad del Centro de Investigación y Estudios Superiores en Antropología Social (CIESAS), en el marco de diferentes proyectos y a partir de registros del Sistema Nacional de Protección Civil; declaratorias de desastres naturales para efectos del Fondo de Desastres Naturales (FONDEN); datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) y en su mayoría de noticias de periódicos nacionales (El Excélsior, El Universal y La Jornada). Particularmente el inventario proporciona fecha, tipo de evento, localización (estado y municipio), lugar, fuente de información, observaciones sobre los efectos, muertes, desaparecidos, heridos/enfermos, víctimas afectados, evacuados, reubicados, casas destruidas, casas afectadas, cultivos y bosque (hectáreas), rutas afectadas, centros educativos y de salud, ganado, valor de pérdida (pesos y dolares), tipo de causa, observaciones sobre la causa, entre otros.

Otro inventario de procesos de remoción en masa a nivel nacional, es el Inventario Nacional de Fenómenos Geológicos Escala 1:250 000, que comprende información bibliocartográfica compilada en el año 2011 por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Los datos proporcionados constituyen la ocurrencia de sismos, aparatos volcánicos, tipo de erupciones, inundaciones, erosión costera, movimientos en masa, subsidencia y colapsos. Este inventario para cada fenómeno contiene información específica, en particular para los movimientos en masa proporciona el tipo de movimiento y clase (deslizamiento rotacional, flujo de detritos, caído, etc.), factor detonante, precipitación anual, volumen desprendido, afectaciones, litología, estructura, coordenadas geográficas, estado, municipio, localidad, fecha de registro, fuente de información, observaciones y aproximación de la representación.

Otras fuentes que nos brindan información de inventarios de PRM, son artículos elaborados en áreas locales, de los diferentes estados de la República Mexicana. Por ejemplo: Paz *et al.* (2017), en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, hacen una validación de un mapa de susceptibilidad con movimientos en masa desencadenados por el sismo de magnitud 8.2 del 7 de septiembre de 2017; Legorreta *et al.* (2013), Legorreta *et al.* (2014), y Alanís-Anaya *et al.* (2017), en el Volcán Pico de Orizaba, generando el inventario de PRM a partir de

fotografías aéreas multitemporales, sensores remotos (SPOT, Satellite Pour l'Observation de la Terre: Satélite Para la Observación de la Tierra), así como también con apoyo de las imágenes de Google Earth.

Por otro lado, Gaidzik *et al.* (2017), en las montañas bajo cubierta de bosques de Guerrero genera un inventario de procesos utilizando dos enfoques: 1) mapeo manual usando imágenes satelitales y 2) identificación automática de la morfología de movimientos en masa utilizando el Método de Conexión de Contorno (CCM, Contour Connection Method) con Modelos Digitales de Terreno LIDAR (Light Detection And Ranging).

Además, Hernández-Madrigal *et al.* (2010), en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán, generan un inventario de procesos separando la zona de escarpe y la zona del depósito de los movimientos en masa. Muñiz-Jauregui y Hernández-Madrigal (2012), en Puerto Vallarta, Jalisco, utilizaron fotografías aéreas y curvas de nivel. Además, se complementó con reportes históricos, obtenidos de notas periodísticas; información de la Unidad Municipal de Protección Civil de Puerto Vallarta; población damnificada y evidencias en campo. A partir del trazo del cuerpo del PRM se estableció un área alrededor de éste con el fin de contemplar una posible zona inestable por efectos del mismo proceso que le dio origen (Muñiz-Jauregui y Hernández-Madrigal, 2012).

1.1.3. Mapas de susceptibilidad por movimientos en masa

Según Suárez (2009) el mapa de susceptibilidad de PRM consiste en clasificar la inestabilidad relativa de la ocurrencia de los procesos de remoción en masa en un área. Este se hace tomando en cuenta los factores intrínsecos preexistentes en los PRM del área de estudio.

En México los mapas de susceptibilidad de inestabilidad de laderas son elaborados frecuentemente como un primer acercamiento al análisis de un estudio de riesgo, utilizando los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estos mapas permiten identificar las zonas donde es necesaria o conveniente la realización de estudios complementarios (Ayala-Carcedo, 2002).

La elaboración de mapas de susceptibilidad a partir de los SIG se inició en 1988 (Suárez, 2009) y actualmente son una herramienta muy utilizada para el mismo fin. Algunos casos de

estudio son en el volcán Pico de Orizaba por Legorreta *et al.* (2013), y Legorreta *et al.* (2014), utilizando ArcMap y LOGISNET; en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas por Paz *et al.* (2017), también utilizaron ArcMap; Muñiz-Jauregui y Hernández-Madrigal (2012) utilizaron ArcGis 9.3 y Arcview 3.2 en Puerto Vallarta, Jalisco; en Huehuetla, Puebla y Metztlán, Hidalgo, Morales (2018) se apoya con QGis, Global Mapper e ILWIS; García (2017) utiliza ILWIS para la cuenca La Ciénega en el volcán Nevado de Toluca.

En cuanto a los enfoques para estudiar el peligro por movimientos en masa, van Westen (2013), propone la siguiente clasificación: inventarios de PRM, métodos heurísticos, análisis estadísticos y enfoques determinísticos.

Para Casagli *et al.* (2004): “El inventario de movimientos en masa representa el método más básico y simple de evaluación del peligro de PRM. En su forma básica, el mapa de peligro se deriva directamente del mapa de inventario de movimientos en masa. Este método es solo parcialmente satisfactorio porque atribuir niveles de peligro nulos a áreas fuera de los límites de PRM excluye áreas en las que los movimientos no han sido reconocidos actualmente. Por esta razón, este método es adecuado solo en áreas en las que prevalecen los movimientos en masa fácilmente reconocibles” (Casagli *et al.*, 2004, p. 204).

En cuanto al enfoque heurístico, Casagli *et al.* (2004), afirman que: “El enfoque heurístico generalmente se basa en análisis geomorfológicos dirigidos al reconocimiento y la interpretación correcta de los factores que controlan la ocurrencia de movimientos en masa. La evaluación del peligro la lleva a cabo un geomorfólogo, tanto mediante trabajo de campo como mediante fotointerpretación aérea. En algunas aplicaciones, el análisis se logra combinando varios mapas temáticos en los que los factores que afectan la ocurrencia de PRM se ponderan en función de las habilidades y la experiencia del científico de ciencias de la Tierra responsable del análisis. Los enfoques heurísticos han sido criticados repetidamente por varios autores debido a su naturaleza altamente subjetiva” (Casagli *et al.*, 2004, p. 204).

Van Westen (2013), afirma que “la evaluación de la susceptibilidad a los PRM mediante métodos estadísticos es considerada como un método atractivo por muchos investigadores, ya que es un método objetivo, que también es reproducible. Esto significa que se podrían obtener los mismos resultados si otras personas lo repitieran. Sin embargo, esto no es realmente cierto, ya que el método depende en gran medida de la calidad de los mapas de

inventario de movimientos en masa y los mapas de factores contribuyentes. Y aún más, depende del conocimiento de la persona que realiza la evaluación. Tales métodos no pueden ser automatizados. También requerirán un aporte muy sustancial basado en expertos, para decidir qué factores (o combinaciones de factores) contribuyen a la ocurrencia de procesos” (van Westen, 2013, p. 31).

En los modelos estadísticos, también conocidos como modelos de caja negra, el conocimiento experto y los datos de entrada de alta calidad son esenciales (van Westen, 2013).

Carrara (1983) y Hartlen y Viberg (1988) definen los modelos determinísticos, también conocidos como modelos de caja blanca, aquellos que se basan en los modelos físicos de estabilidad de taludes y modelos hidrológicos (Carrara, 1983 y Harlen y Viberg, 1988).

Suárez (2009), señala que: “En los métodos determinísticos el grado de amenaza se expresa con el factor de seguridad de la ladera. Para esto, se elaboran los modelos de análisis de estabilidad de taludes con base en la información obtenida y se calculan los factores de seguridad para el movimiento en masa. Estos modelos requieren información específica sobre la estratificación, estructura, propiedades de resistencia de los materiales y modelos de simulación de niveles freáticos, de acuerdo con los períodos de retorno” (Suárez, 2009, p. 555).

Finalmente, para hacer una zonificación de amenaza por movimientos en masa, es muy importante considerar la escala de trabajo, pues esta nos guiará para elegir el método adecuado de zonificación, además nos permitirá identificar los alcances o limitaciones de los resultados. El Servicio Geológico Colombiano (2017), clasifica al rango de escalas de 1:100,000 a 1:10,000, como escalas medias. Los análisis a estas escalas, logran alcanzar los objetivos de generar planes de ordenamiento territorial y planes de manejo de cuencas (SGC, 2017).

1.2. Justificación

De acuerdo con Ocampo *et al.* (2016), a nivel mundial el número de víctimas y daños en desastres por fenómenos naturales ha ido incrementándose cada vez más; el 14% de las víctimas de catástrofes naturales son atribuidas a la inestabilidad de laderas. Según datos del Resumen Ejecutivo de impacto socioeconómico de los desastres en México durante 2015, el impacto de los fenómenos geológicos fue de 246.9 millones de pesos. De esta cifra, 96.71% fue por deslizamiento de laderas. Además, los fenómenos geológicos ocasionaron la muerte de 11 personas: ocho de ellas a causa de deslizamiento de laderas y tres por deslaves (CENAPRED, 2016). Por otro lado, el informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres (2009) reporta que, datos empíricos demuestran que las zonas pobres sufren en los desastres niveles de daños desproporcionadamente altos, es decir, los desastres no empobrecen a todos. Los hogares pobres son mucho menos resistentes a las pérdidas que los hogares más acaudalados, por lo que se sumen aún más en la pobreza y tienen mayores dificultades para recuperarse.

Con el presente trabajo se busca zonificar la susceptibilidad de deslizamientos en una región en situación de pobreza, a partir de un análisis multicriterio, considerando los factores intrínsecos del área de estudio. Asimismo, los resultados del estudio ayudarán a mejorar la planeación de ordenamiento territorial de la población, con la finalidad de disminuir daños causados por los eventos de deslizamientos. Por otro lado, la elaboración del análisis se adecuará para zonas altamente marginadas, es decir, funcionará como una guía para hacer estudios de este tipo en áreas de bajos recursos.

1.3. Problemas de Investigación

¿Cuáles son las zonas más susceptibles a los movimientos en masa en la cuenca del río Huahua, considerando los factores condicionantes del área de estudio?

¿Cuáles son los procesos de remoción en masa que predominan en el área de estudio y dónde se encuentran?

¿Qué factor (o factores) es el que más influye en la ocurrencia de PRM en la cuenca del río Huahua?

1.4.Objetivo general:

Delimitar, a partir de métodos estadísticos bivariados, las zonas susceptibles a procesos de remoción en masa en la cuenca del río Huahua, en la región Sierra-Costa de Michoacán.

1.4.1. Objetivos específicos:

Elaborar un inventario de los movimientos en masa en la cuenca del río Huahua para a partir del mismo conocer las áreas más propensas a la ocurrencia de estos fenómenos geológicos.

Identificar la relevancia de los aspectos morfométricos en la generación de mapas de zonificación de procesos de remoción en masa (PRM).

Generar un mapa geológico en la cuenca del río Huahua para identificar la influencia que tiene cada unidad geológica en la ocurrencia de los PRM.

Identificar las zonas más susceptibles a la ocurrencia de PRM en función de los factores condicionantes.

CAPÍTULO 2. ZONA DE ESTUDIO

La región de Sierra-Costa de Michoacán comprende territorios de los municipios de Coahuayana, Chinicuila, Aquila, Coalcomán, Aguililla, Tumbiscatío, Arteaga y Lázaro Cárdenas, con una extensión total de 13 000 km². Abarca la franja irregular de llanuras costeras del Pacífico Michoacano, comprendido desde la desembocadura del río Balsas (Boca de San Francisco), hasta el río Coahuayana (Boca de Apiza) con una longitud de 208 km en línea recta y de 261.5 km siguiendo las sinuosidades de la costa. Estas bocas constituyen los límites estatales con Guerrero y Colima (Priego y Bocco, 2015).

2.1. Localización y vías de acceso

El área de estudio se encuentra en la porción suroeste del Estado de Michoacán, específicamente en la zona central de la región Sierra-Costa, abarcando parte de los municipios de Coalcomán y Aquila (Figura 2.1).

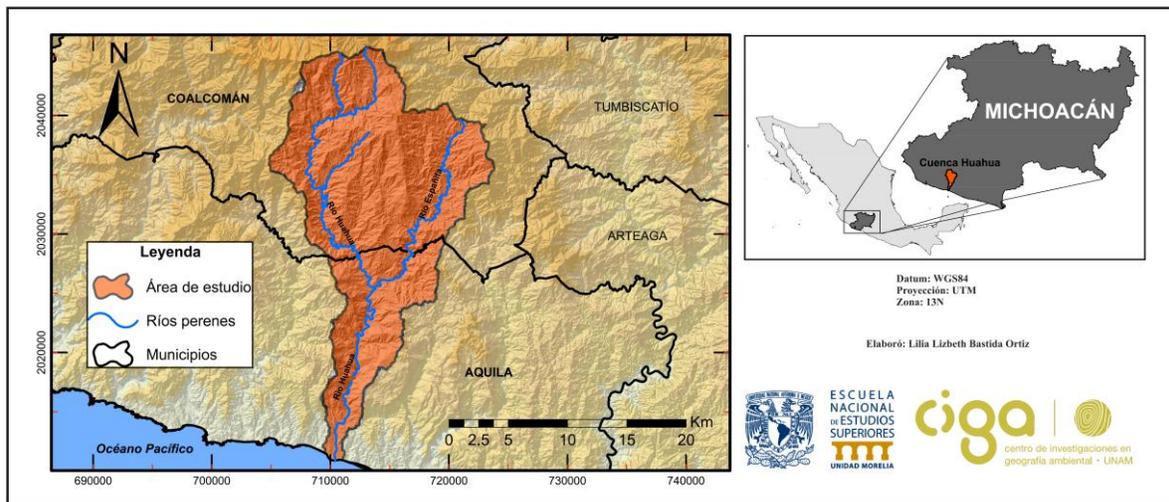


Figura 2.1. Mapa de localización del área de estudio. Cuenca Huahua ubicada en el suroeste del estado, región Sierra-Costa de Michoacán. Se muestran los municipios cercanos de la región.

La cuenca Huahua se localiza entre las coordenadas 687,500 m y 722,500 m Norte; y 2,387,500 m y 2,407,500 m Este, de la zona 13 Norte. La superficie de la cuenca es de 305.5

km². Presenta altitudes que varían desde el nivel medio del mar (msnm) hasta los 2,680 msnm.

La principal vía de acceso que se encuentra en la zona es la carretera federal número 200 (Lázaro Cárdenas - Tecomán) que comunica al Sur los municipios de Lázaro Cárdenas y Aquila, y éstos a su vez con el estado de Colima. El área de estudio se encuentra a 90 km al Oeste del municipio de Lázaro Cárdenas y a 125 km de Tecomán, Colima (Figura 2.2). El acceso a las localidades dentro de la cuenca se realiza por medio de caminos de terracería que están en uso todo el año, con algunas dificultades durante la época de lluvias.

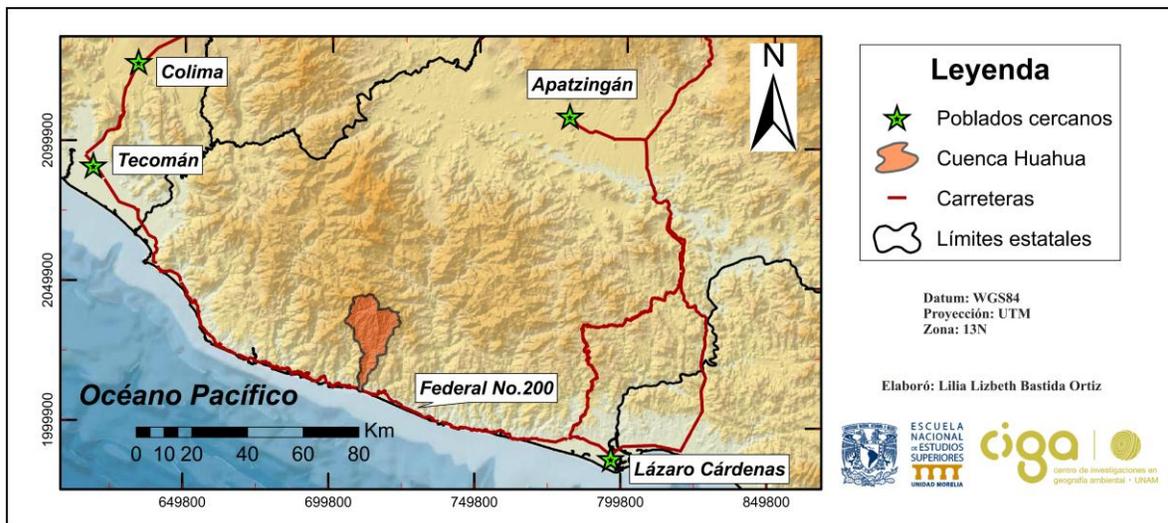


Figura 2.2. Mapa que representa las vías de acceso a la zona de estudio, mostrando los poblados de mayor población en la región.

2.2. Relieve

Un estudio realizado por Ramírez-Herrera y Urrutia-Fucuguachi (1999), dividen zonas morfotectónicas a lo largo de la costa del sur de México, analizando las características morfológicas regionales y la correlación con segmentos sismotectónicos, tectónica regional y características batimétricas principales. Entre esta división, se encuentra la Zona de Michoacán.

“La zona de Michoacán se extiende desde el flanco sur de los grabens de El Gordo-Colima hasta la proyección de la zona de fractura Orozco (OFZ), por el cañón submarino Balsas,

hacia la costa (Fig. 2.3). Las costas tienen altos acantilados, puntos rocosos y se alternan con playas estrechas; altas (>600 m) montañas con fallas alcanzan la costa. Hacia el interior la costa está bordeada por montañas altas plegadas y falladas. Las corrientes que drenan la superficie, hacen fuertes incisiones, hasta desembocar en la costa. El ancho de la plataforma continental varía lateralmente desde <1 km hasta 2 km. La distancia a la trinchera está más cerca de las fronteras marcadas por las características batimétricas del graben El Gordo y la OFZ. La evidencia geomórfica de elevación es clara en esta zona. Las terrazas marinas, las muescas elevadas cortadas por las olas y las terrazas de los ríos están presentes en esta región, particularmente al sur de Tizupan hasta Chucutitán NW de Playa Azul. Las terrazas marinas que se han identificado varían de 5-6 m a 8 m sobre el nivel del mar. El rango de marea aquí es 0.5 m” (Ramírez-Herrera y Urrutia-Fucuguachi, 1999, p. 243).

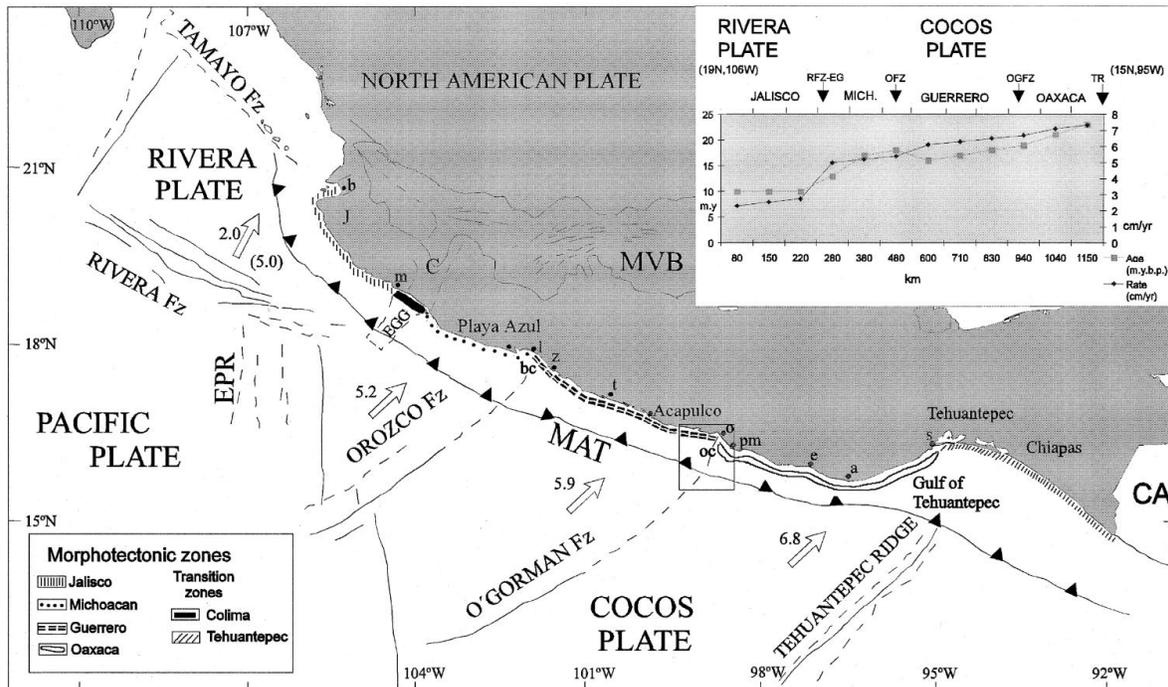


Figura 2.3. Configuración tectónica y zonas morfotectónicas a lo largo de las costas del sur de México. Símbolos: MAT-Trinchera de América Central, EPR-Elevación del Pacífico Oriental, EGG-Graben El Gordo, Fz-Zona de falla, J-Bloque Jalisco, C-Graben Colima, MVB-Cinturón Volcánico Mexicano, CA-América Central, bc-Cañón submarino Balsas, oc-Cañón submarino Ometepec. Se muestra la edad en Ma y la tasa de subducción en cm/año de las placas tectónicas de América Central. Nombres de sitios: b-Bahía de Banderas, m-Manzanillo, l-Lagunillas, z-Zihuatanejo-Ixtapa, t-Tecpan, o-Ometepec, pm-Punta Maldonado, e-Puerto Escondido, a-Puerto Ángel, s-Salina Cruz. Fuente: Ramírez-Herrera y Urrutia-Fucugauchi, 1999.

Los autores concluyen que la evidencia morfológica, en las costas de la zona de Michoacán son predominantemente rocosas con acantilados, playas estrechas y terrazas marinas, lo cual sugiere elevación tectónica a largo plazo (Ramírez-Herrera y Urrutia-Fucuguachi, 1999).

La región Sierra-Costa de Michoacán pertenece a la provincia fisiográfica Sierra Madre del Sur. El Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo coloca a Aquila, Lázaro Cárdenas y la sección Suroeste de Arteaga en la subprovincia Costas del Sur, mientras que los municipios de Chinicuilá, Coalcomán, Aguililla, Tumbiscatío y la sección Norte de Arteaga son ubicados en la subprovincia Cordillera Costera del Sur (INEGI, 2016).

La historia paleogeográfica reciente del área ha condicionado fuertemente al relieve del territorio (INEGI, 1985); el territorio se caracteriza por la fuerte energía del relieve, predominando ampliamente las montañas (7,939.4 km²) y lomeríos (3,967.7 km²) sobre los otros tipos de relieve (Fig. 2.4 y Tabla 2.1).

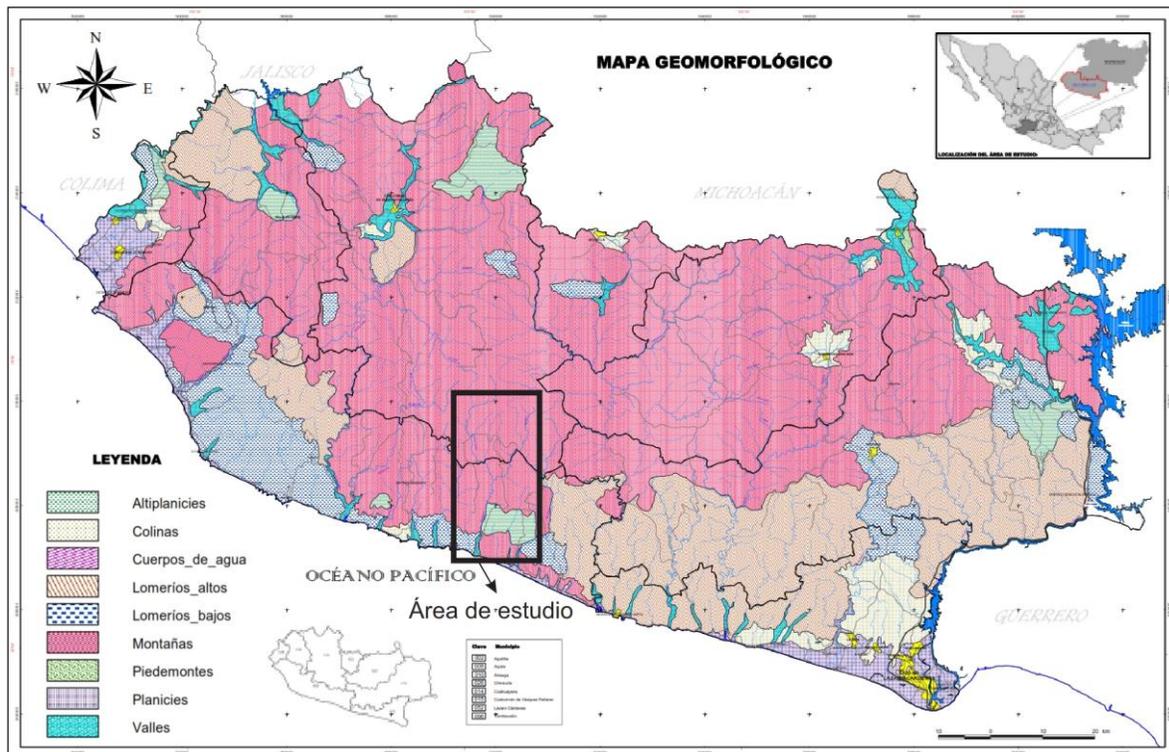


Figura 2.4. Geomorfología de la Sierra-Costa michoacana. El área de estudio se distingue con el rectángulo negro. Se aprecia que en el área predomina el relieve montañoso. Fuente: modificado de Priego et al., 2015.

Tabla 2.1. Distribución de los rasgos geomorfológicos de la región Sierra- Costa de Michoacán (Ortiz, 2000).

Geoforma	Área (km²)
Montañas	7,939.4
Lomeríos altos	2,821.1
Lomeríos bajos	1,146.6
Colinas	489.3
Valles	396.2
Planicies	339.4
Altiplanicies	326.3
Piedemontes	7.8

2.3. Geología

2.3.1. Marco geológico-tectónico regional

La Sierra Madre del Sur (SMS) es una provincia fisiográfica que se extiende por ~1,100 km a lo largo de la costa pacífica del sur de México, desde la ciudad de Puerto Vallarta hasta el golfo de Tehuantepec (Martini, 2008). De acuerdo con la clasificación de los terrenos tectono-estratigráficos de Centeno-García *et al.* (2008), la SMS se encuentra dentro de los terrenos: Guerrero, Mixteco, Oaxaquia, Xolapa y Juárez. La región Sierra-Costa de Michoacán está dentro del terreno Guerrero, que por su complejidad estratigráfica y estilo estructural regional se ha dividido en varios subterrenos, de los cuales en el subterreno Zihuatanejo se encuentra la región antes mencionada (SGM, 2002).

Centeno-García (1993), sugiere dos etapas en la evolución del terreno Guerrero. La primera etapa representa un prisma de acreción, registrado en el complejo Arteaga (Triásico superior), y la segunda etapa es el desarrollo de un arco de isla intraoceánico (Jurásico tardío al Cretácico medio) observado en la parte superior del complejo Arteaga.

Para comprender la configuración geográfica actual de la SMS, es necesario hacer referencia a la interacción que ha tenido el bloque continental con las provincias oceánicas que lo circundan, considerando que en el Pacífico sur de México se tiene un límite de placas convergentes desde cabo Corrientes, Jalisco, hacia América Central, donde la placa oceánica de Cocos está subduciendo a lo largo de la trinchera de Acapulco o trinchera Mesoamericana,

debajo de la placa Norteamericana (Velasco de León *et al.*, 2016). Desde el comienzo del Paleógeno y hasta los 29 Ma, la placa Farallón se consumió debajo del sur de México; la subducción de la placa de Guadalupe, formada por la fragmentación de la placa de Farallón, ocurrió durante el período entre 29 y 12.5 Ma y desde hace 12.5 Ma las placas de Cocos y Rivera han sido anuladas por Norteamérica a lo largo de la trinchera de Acapulco (Morán-Zenteno *et al.*, 1999; tomado de Mammerickx y Klitgord, 1982) debido a la migración de la placa de Norteamérica hacia el noroeste y oeste, dando como consecuencia que el arco magmático desarrollado durante el Jurásico superior migrara hacia el noreste en el interior del continente, seguido por otros arcos magmáticos del Cretácico y Cenozoico (Velasco de León *et al.*, 2016). En intervalo ocurrido durante el Oligoceno al Mioceno, el reordenamiento de las placas oceánicas no produjo variaciones significativas en la corteza oceánica que se subduce, sino solo pequeñas variaciones en los vectores de convergencia (Morán-Zenteno *et al.*, 1999).

Actualmente, la litosfera oceánica que subduce a lo largo de la trinchera de Acapulco se divide en los segmentos correspondientes a la placa de Cocos y a la placa de Rivera (Fig. 2.3). La placa de Cocos tiene un desplazamiento relativo con respecto a la zona continental de México, definido por un polo de rotación NW-SE que se encuentra ubicado frente a las costas de Baja California, cuya velocidad de convergencia varía de 5.5 a 6.8 cm/año (Morán-Zenteno *et al.*, 2005; de Pardo y Suárez, 1995; DeMets y Traylen, 2000).

2.3.2. Estratigrafía

El subterreno Zihuatanejo es el más grande de todos los terrenos que forman el terreno compuesto Guerrero (Centeno-García *et al.*, 2003) y se extiende en gran parte de la costa michoacana (Fig. 2.5). En esta zona costera, Petróleos Mexicanos (PEMEX) realizó muchos de los trabajos originales, sin embargo, fueron reportes no publicados. Localmente, las compañías mineras y de exploración también han realizado mapas, pero nuevamente se han publicado pocas. Como resultado, es difícil tener acceso a la información pues, hay muchos nombres de formaciones locales y, a veces, las mismas rocas se describen con dos nombres. Estos han hecho que la compilación regional, la correlación de unidades y su interpretación sean muy difícil (Centeno-García *et al.*, 2003).

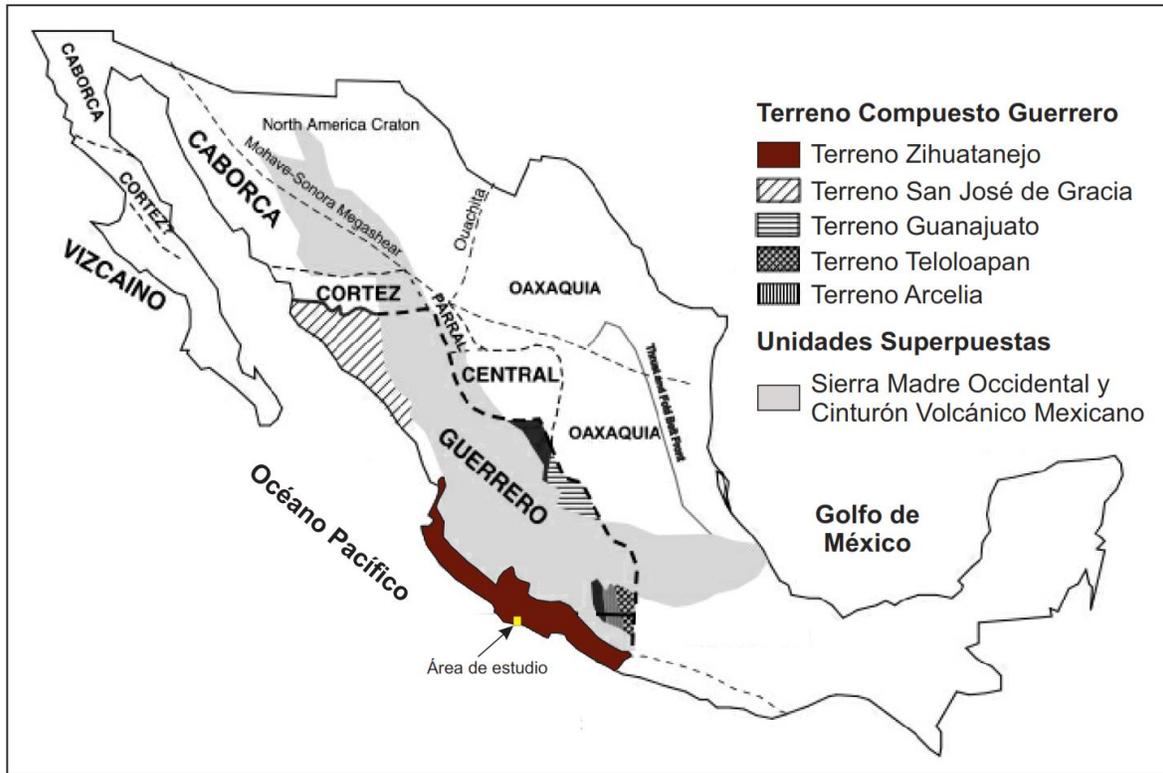


Figura 2.5. Terreno Guerrero. Se muestra la ubicación del subterreno Zihuatanejo y otros terrenos tectonoestratigráficos de México. El área de estudio se señala con un punto amarillo. Fuente: modificado de Centeno-García et al., 2003.

Posteriormente, el Servicio Geológico Mexicano publicó mapas geológicos en 2002 y Centeno-García et al. (2003), publicaron datos de un transecto en la parte sur (de Puerto Vallarta a Zihuatanejo) del subterreno Zihuatanejo.

Mesozoico

El Complejo Arteaga constituye las rocas más antiguas del subterreno Zihuatanejo. En la costa michoacana afloran en el área de Arteaga-Tumbiscatío y están constituidas por gneis, esquisto y cuarcita, de edad Triásico-Jurásico inferior (Centeno-García, 1994).

Según Vidal-Serratos (1986), a partir del Berriasiano en la costa de Michoacán, entre lo que es ahora Aquila y Lázaro Cárdenas, se depositan varias secuencias volcanosedimentarias que corresponden a facies de un arco volcánico insular, relacionado al subterreno Zihuatanejo (Vidal-Serratos, 1986). La evolución tectónica, a grandes rasgos, correspondería a un macizo

de arco, representado en la Formación Tacalatlán, y una cuenca trasarco en donde la secuencia que se depositó (Formación Alberca) presenta una relación lateral de interdigitación con la Formación Tecalatlán, al menos dos secuencias transicionales originadas entre el arco y la cuenca (formaciones Tepalcatepec y Zihuatanejo) y algunas secuencias detríticas (Miembro La Unión) y calcáreas originadas en condiciones de cuenca (Vidal-Serratos, 1986).

La Formación Tecalatlán, se extiende ampliamente al norte de la región de Aquila, entre Coalcomán y Aguililla, está constituida por derrames, tobas, aglomerados y brechas de composición riolítica a andesítica, de edad Berriasiano-Aptiano (Pantoja, 1974). La formación Tepalcatepec consiste en una unidad volcanosedimentaria con bancos calcáreos de escaso desarrollo vertical y horizontal, lutita, arenisca, toba riolítica y dacítica, conglomerados, niveles detríticos y escasos derrames andesíticos, que aflora en la región de Tepalcatepec y Coalcomán, al norte del área de Aquila. A esta formación Murguía-Rojas (1991), le asignó una edad Aptiano-Albiano por medio de dataciones paleontológicas realizadas por PEMEX (Fig. 2.6).

También está presente la Formación Zihuatanejo, constituida por los miembros Ixtapa Mixto y La Unión (Fig. 2.6). El primero consiste en intercalaciones de toba andesítica, arenisca epiclástica, derrames andesíticos, dacita, lentes de caliza, así como gruesos paquetes de caliza masiva; mientras que el miembro La Unión presenta intercalación de arenisca, limonita, caliza y conglomerado polimíctico y se distribuye ampliamente en la región, especialmente en el área de Caleta de Campo y en las inmediaciones del poblado de Aquila (Bustamante y Piñero, 2006).

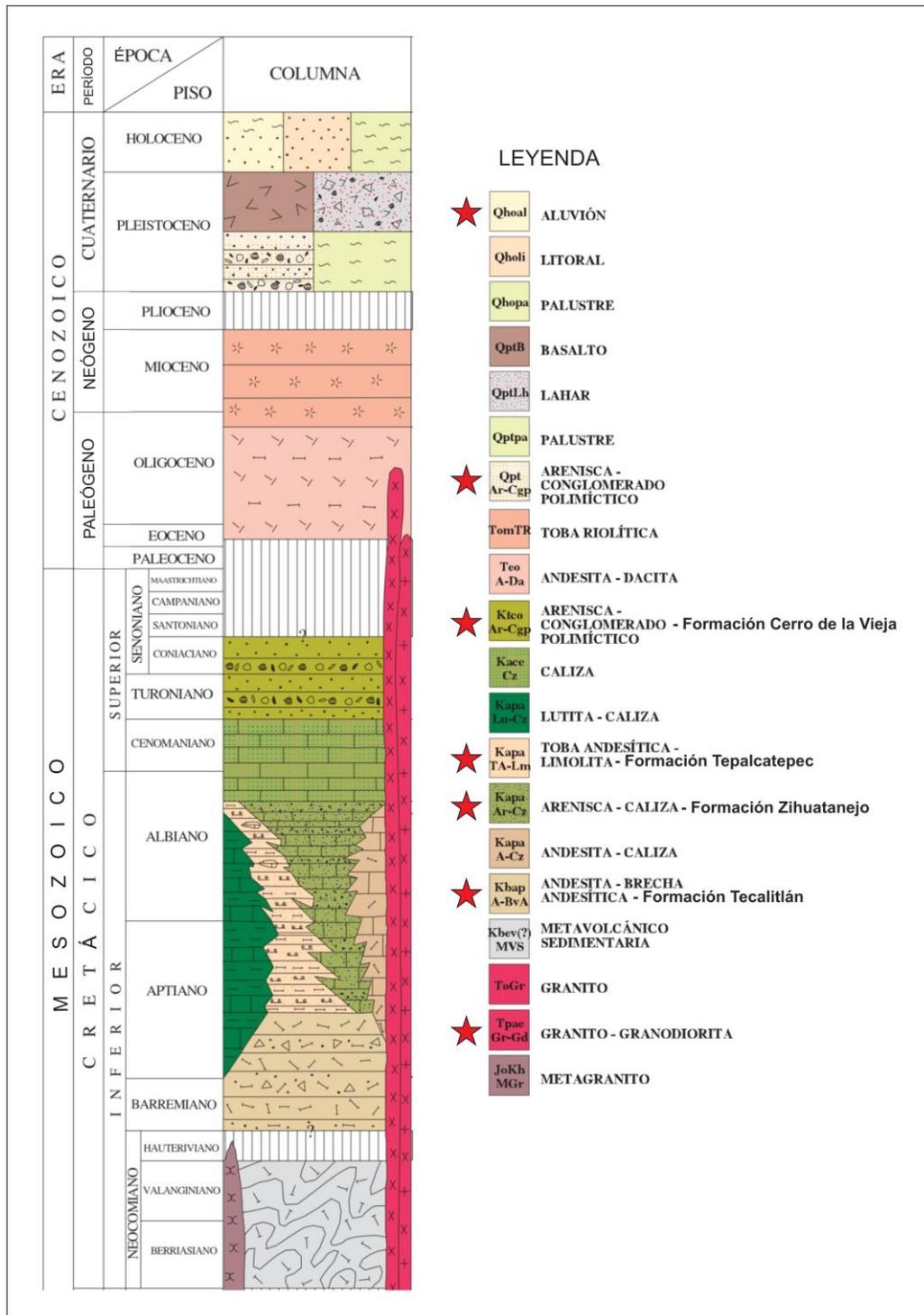


Figura 2.6. Columna estratigráfica donde se observan Formaciones que afloran en el área de estudio (marcadas con la estrella) o cerca de la misma. Fuente: modificado del SGM, 2002. Nota: se modificó la tabla del tiempo geológico, pues el Terciario ya es un término obsoleto dentro de la tabla cronoestratigráfica internacional 2020.

En cuanto a estudios recientes sobre la geología del subterreno Zihuatanejo en la costa de Michoacán, es el publicado por Centeno-García et al. (2011). Estos autores generan un mapa geológico regional dividiendo las rocas cretácicas de la zona en dos ensambles: el ensamble 1, corresponde a un ensamble de cuenca de arco extensional del Cretácico inferior-medio y el ensamble 2, consiste en un ensamble de arco contraccional de edad Santoniano-Maastrichtiano. Las unidades predominantes en dicho trabajo son: rocas y sedimentos volcánicos y sedimentarios Cuaternarios en un 44%, rocas volcánicas y sedimentarias del Cretácico inferior en un 15%, granitoides de edad Maastrichtiano-Paleoceno en un 9%, el Complejo Arteaga en un 7% y la Fm. Cerro de la Vieja en un 5%. Las unidades restantes se encuentran entre 0.1% y 3% (Fig. 2.7).

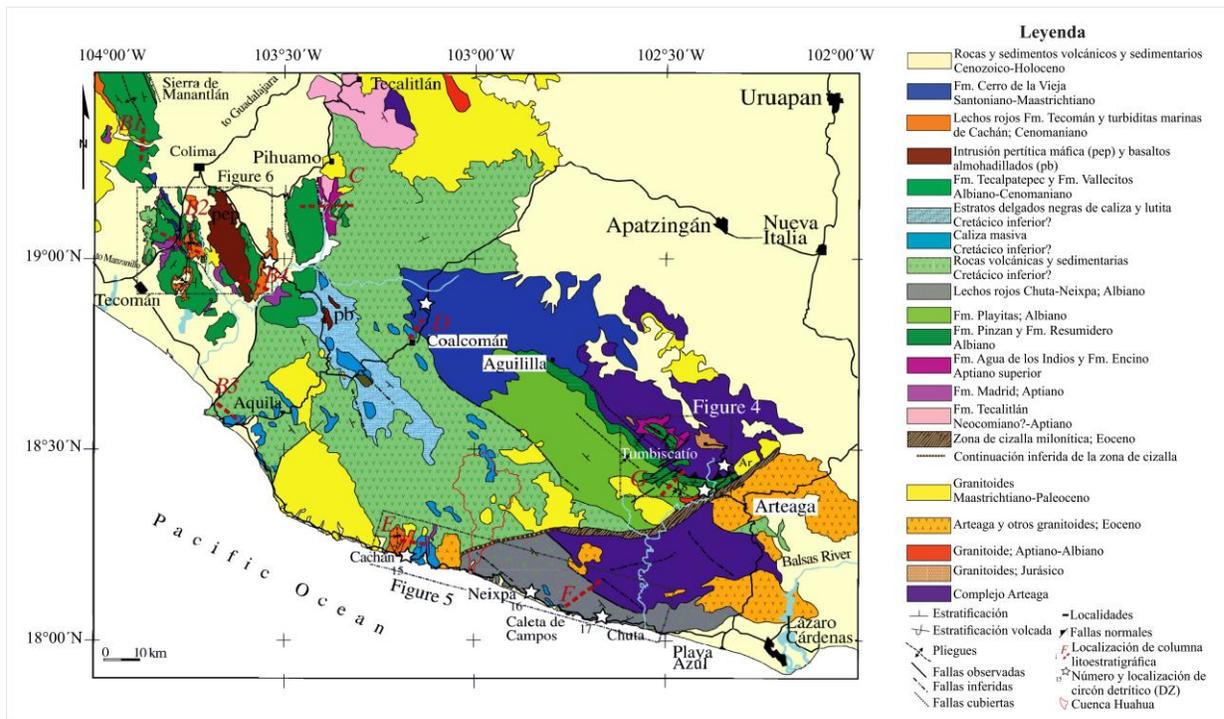


Figura 2.7. Mapa geológico del terreno Zihuatanejo, tomado de Centeno-García et al., (2011). Se muestra de color rojo el polígono de la cuenca Huahua.

Los ensambles anteriormente mencionados, Centeno-Gracia et al. (2011), los describe con columnas estratigráficas distribuidas en distintas áreas de la zona de estudio. A continuación, se describe la columna F, E y D, las cuales se encuentran relativamente cerca de la cuenca Huahua (Figura 2.8 y 2.9).

Columna F

Esta columna describe la sección Chuta-Neixpa (Fig. 2.8, columna F); está dominada por areniscas volcánicas no marinas, limolitas y conglomerados, con flujos de lava riolíticos e ignimbritas y pequeños flujos de lavas andesíticas y dacíticas. Según Ferrusquía et al., (1978) las rocas sedimentarias clásticas contienen huellas de dinosaurios, así como marcas de gotas de lluvia, grietas de desecación y paleosuelos. Las calizas se encuentran en algunos horizontes (<20 m de espesor) dentro de la sección. Contiene orbitolínidos, *Nummuloculina heimi*, gasterópodos, *Cerythium* sp., y algunos pelecípodos, los cuales son reportados en estratos Albianos en el área por Ferrusquía et al., (1978) y por observaciones de Centeno et al., (2011). Estas rocas fueron depositadas sobre el Complejo Arteaga o están en contacto de falla (lateral izquierda Cenozoica) con el mismo (Centeno-García et al., 2011).

Columna E

Esta columna se ubica en la localidad de Cachán. Consiste en flujos de lava de dacita a riolita y brechas hialoclásticas, depósitos de flujo piroclástico y tobas (Fig. 2.8, columna E). Estas rocas están conformadas por una sección de turbidita de arenisca-lutita, con capas intermedias de estratos delgados de caliza cerca de la parte superior. Las areniscas de la turbidita son predominantemente estratos delgados con clasificación normal, laminación cruzada ondulada, clastos y bases erosivas. El esquisto es de laminación muy delgada y se encuentra en lugares calcáreos o con estratos de calcarenitas. El espesor de la sección de turbidita es de 600 m y sobre ésta, en un espesor de ~100 m, gradualmente se encuentra una caliza sin registro fósil. Centeno et al (2011), sugieren que la edad de estas turbiditas es del Cretácico superior, la cual corresponde a la Formación Tecomán que se encuentra en la región de Colima; por esta razón proponen que las rocas de Cachán registran un cambio lateral de facies, desde los lechos rojos de la Formación Tecomán hasta los estratos marinos en Cachán (Centeno-García et al., 2011).

La sección que midieron los autores subyace a un grueso cuerpo de roca caliza, que a su vez se superpone con intercalaciones de lutitas y areniscas cortadas por diapiros de yeso (Centeno et al., 2011).

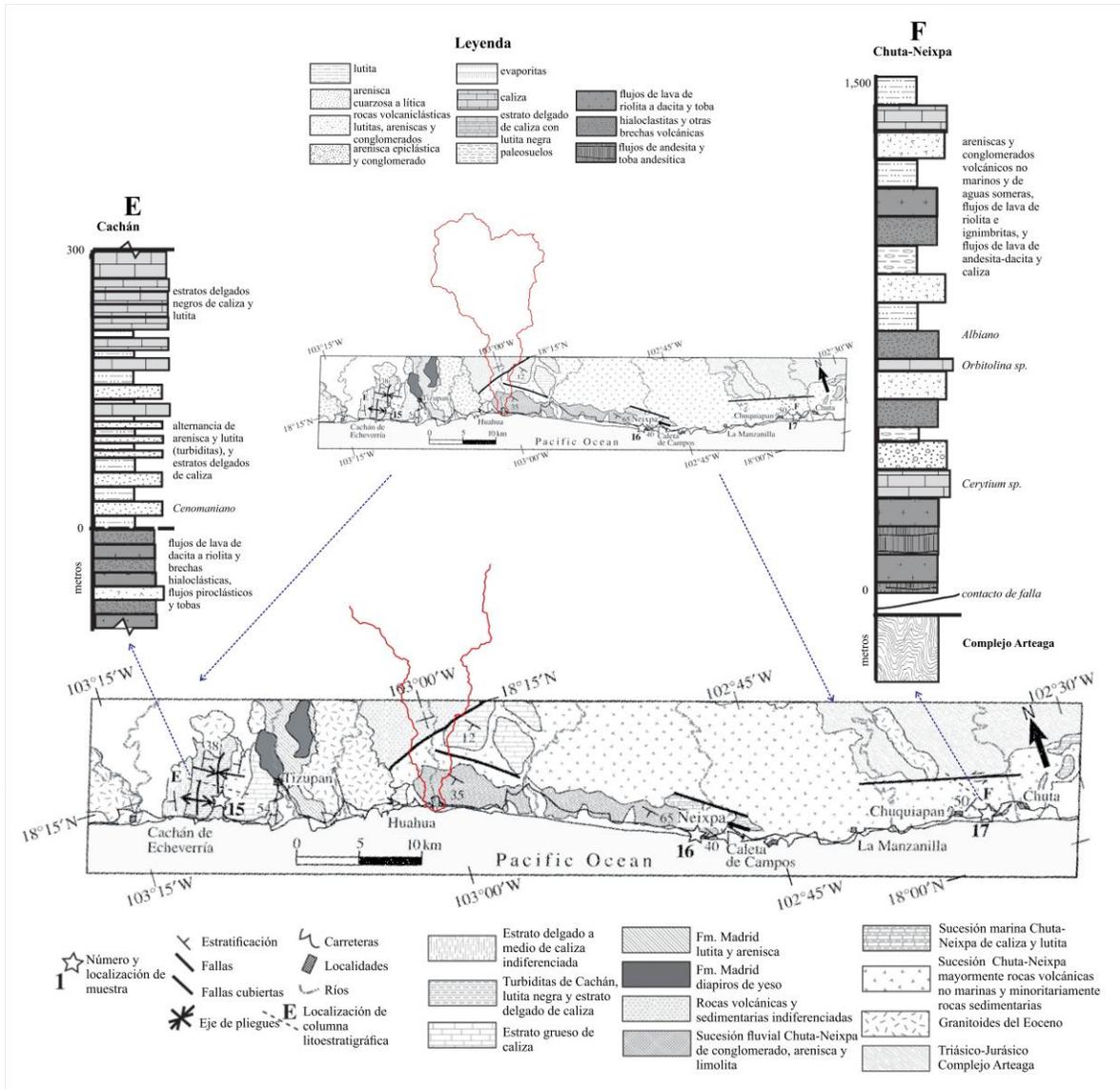


Figura 2.8. Columnas estratigráficas cerca de la zona de estudio (polígono rojo), tomadas de la compilación de información de Centeno-García et al. (2011). En la parte inferior de la imagen se muestra su localización cercana a la costa. Fuente: mapa modificado de Centeno-García et al., 2011.

Columna D

Esta columna se ubica al norte de Coalcomán de Vázquez Pallares (Fig. 2.9). El Ensamble 1 consisten en ~ 500 m de alternancia de caliza y lutita calcárea, con pequeños horizontes de lava almohadillada. Contiene abundantes fósiles invertebrados, incluido el rudista Coalcomana ramosa de edad Albiano temprano. Alvarado-Méndez et al. (2004), consideró

las rocas expuestas al norte de la ciudad de Coalcomán como parte de la sucesión volcánica y clástica del Cretácico inferior; sin embargo, el trabajo de Centeno-García et al (2011) demuestra que son parte del ensamble 2, correspondiente al arco contraccional del Santoniano-Maastrichtiano.

“Ensamble 2. Rocas volcánicas y sedimentarias de arco continental sobre rocas volcánicas y sedimentarias de arco insular de Cretácico inferior plegadas en inconformidad angular en Coalcomán (Fig. 2.7, ubicación de columna D). La sección continental en Coalcomán tiene >1000 m de espesor; consiste en flujos de lava y tobas riolíticas a dacíticas continentales, interestratificados con areniscas fluviales volcánicas líticas, depósitos de flujo de escombros líticos volcánicos y limolitas. la presencia de flujos de lava silícica indica proximidad a las regiones de ventilación. Los lechos rojos muestran abundantes laminaciones cruzadas y planas, además de estructuras de corte y relleno típicas de los canales de arroyos, y las limolitas laminadas a masivas muestran horizontes de suelo típicos de ambientes fluviales. Los horizontes de paleosuelo ocurren en varios niveles estratigráficos. Las estructuras y texturas sedimentarias son similares a las de los lechos rojos de Colima de la misma edad, pero muestran una menor proporción de depósitos de canales fluviales en relación con los depósitos de llanuras de inundación. Los lechos rojos de Coalcomán difieren de los estratos subyacentes de Cretácico inferior a no tener calizas interestratificadas. Esta área aún no está mapeada en detalle” (Centeno-García et al., 2011, p. 1783).

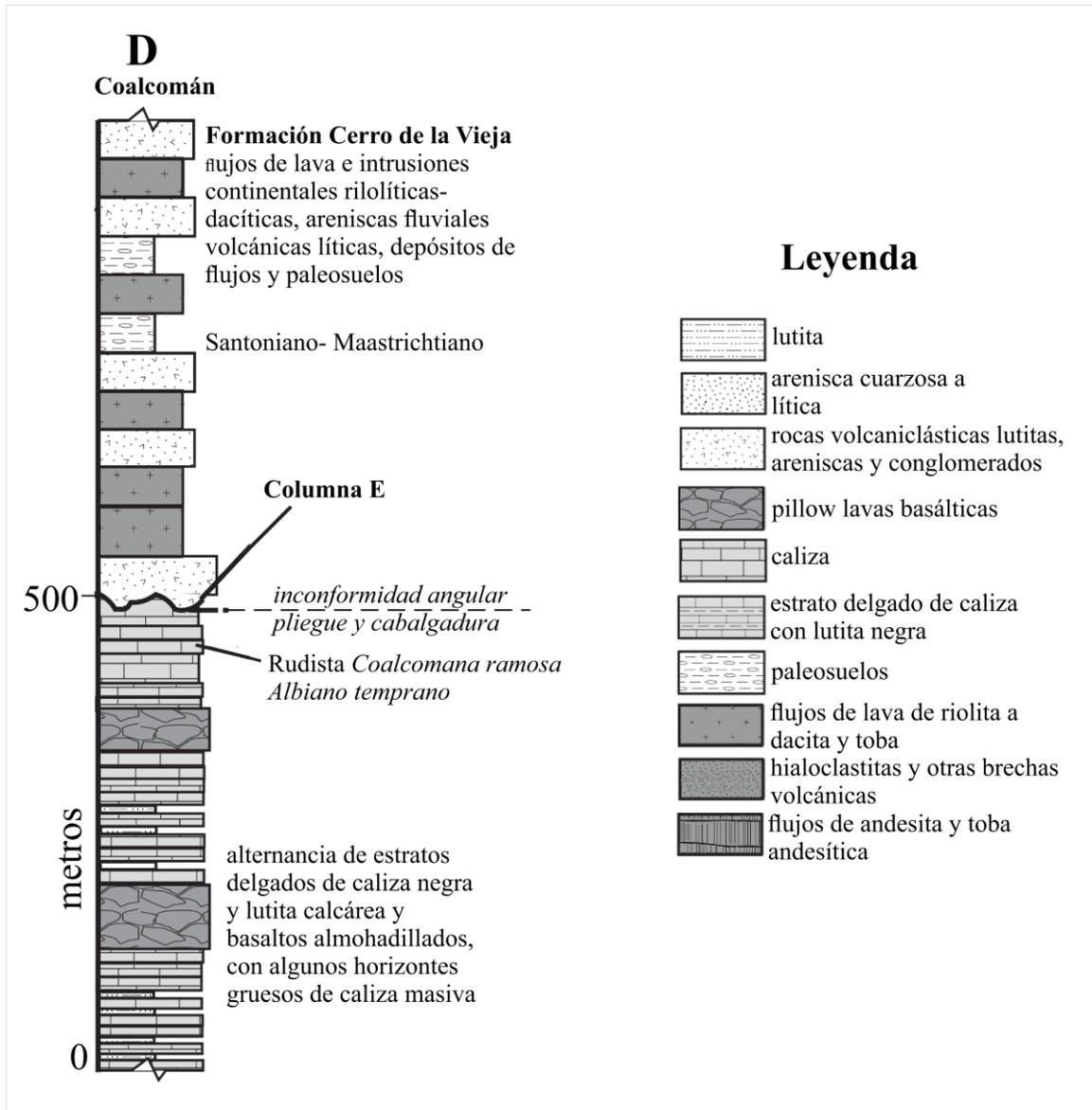


Figura 2.9. Columna D-Coalcomán. Columna estratigráfica que describe las unidades encontradas en la zona norte de Coalcomán. Fuente: modificada de Centeno-García., 2011.

Cenozoico

A fines del Cretácico y principios del Paleógeno se emplazan cuerpos plutónicos de composición granítica, granodiorítica, diorítica con facies de monzonitas y tonalitas, que cortan a las secuencias mesozoicas. Estos cuerpos son parte del Batolito de Michoacán-Guerrero y afloran a través de varios troncos y apófisis en Arteaga, San José de Chila, La

Mira, Ostula, Aquila, Los Pozos y Tizupán; la edad de éstos varía de 84 a 38 Ma, siendo los principales causantes de los yacimientos metálicos en el área (Bustamante et al., 2006).

“Por último, se tienen depósitos no consolidados del Pleistoceno y Holoceno representados por arenas de litoral, limos, arcillas palustres y aluvión, con fragmentos de diversa granulometría en arroyos y planicies aluviales” (Fig. 2.6) (Bustamante y Piñeiro, 2006, p. 20).

2.4. Clima

En la Sierra-Costa de Michoacán predominan ampliamente los climas del grupo húmedo (Tabla 2.3), representados por el cálido subhúmedo y por los templados semicálido y típico. Los climas secos ocupan zonas limítrofes en los sectores Noreste y Noroeste (Fig. 2.10) (Priego *et al.*, 2015).

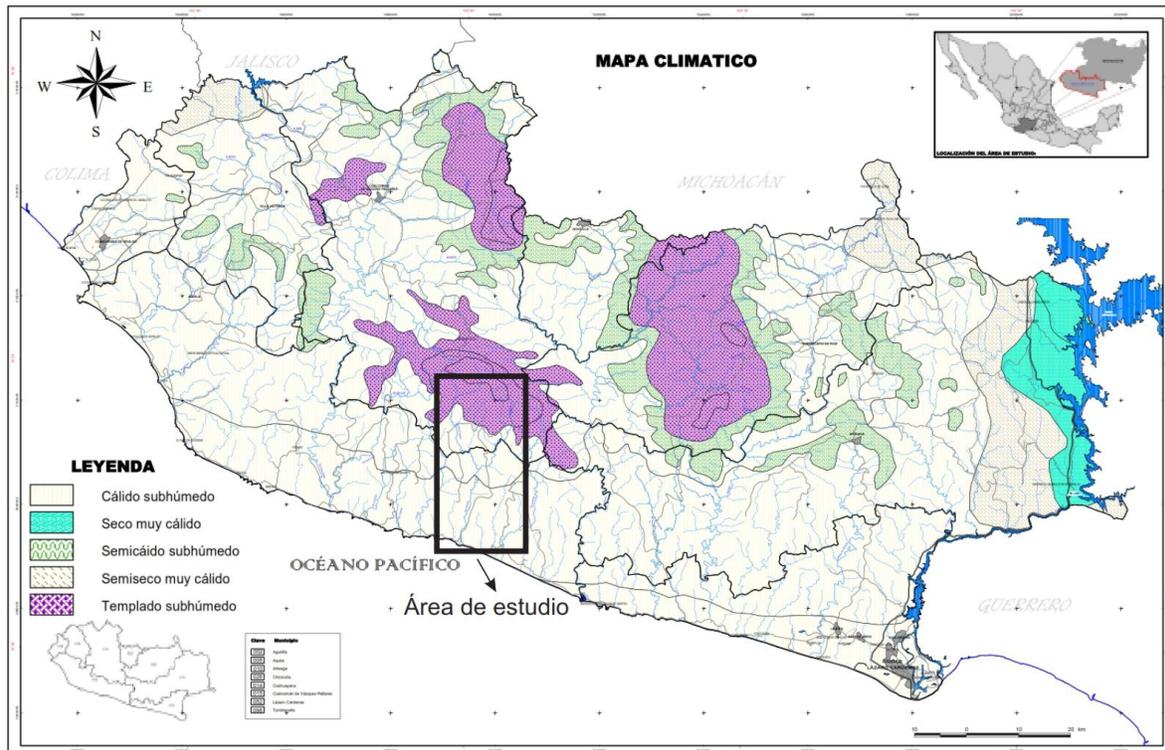


Figura 2.10. Climas de la Sierra-Costa michoacana. El área de estudio se distingue con el rectángulo negro. Se aprecia que en el área de estudio predomina el clima cálido subhúmedo y el templado subhúmedo. Fuente: modificado de Priego *et al.*, 2015.

Tabla 2.3. Tipos climáticos en la región Sierra-Costa de Michoacán (Priego et al., 2015).

Clima			Área (km ²)
Grupo	Tipo	Subtipo	
Húmedo	Cálido	Subhúmedo	9,594.3
	Templados	Típico subhúmedo	1,590.0
		Semicálido subhúmedo	1,286.6
Seco	Árido	Muy cálido	858.8
	Semiárido	Muy cálido	415.9

El clima cálido subhúmedo predominante ocupa toda la zona costera y grandes territorios de la zona montañosa (Fig. 2.10). Los demás climas se distribuyen de manera irregular a lo largo de la zona de estudio.

En la zona montañosa la temperatura media anual es de 26 °C y las lluvias son en verano, por lo que el clima predominante es el Cw, de acuerdo al sistema de clasificación de Köppen modificado por García (1998). Esta temperatura desciende en las áreas ocupadas por los climas templados, pero la precipitación sigue siendo estacional.

En la zona costera, el clima presenta influencia marítima del Océano Pacífico y la temperatura media anual desciende a 29 °C, sin embargo, las precipitaciones siguen siendo estacionales. Los climas secos se presentan, principalmente, alrededor de la presa Infiernillo y los mismos se caracterizan por una disminución drástica de la humedad, aunque conservando elevadas temperaturas (Priego et al., 2015).

En cuanto a precipitación, para el año 2015, según el Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2016, elaborado por el INEGI, en la cuenca huahua la precipitación se distribuye de la siguiente manera: en la zona norte existe una variación pluvial de 1200 a 1500 mm, en la zona centro varía de 1000 a 1200 mm y en la zona sur de 800 a 1000 mm es la variación (INEGI, Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Precipitación Total Anual Escala 1:1 000 000, serie I).

2.5. Suelos

Debido a las características geomorfológicas y climáticas, en la Sierra-Costa de Michoacán predominan los suelos típicos de zonas montañosas, como los Leptosoles y Regosoles, sin embargo, los más abundantes son los Luvisoles, debido a la gran abundancia de rocas ígneas en la región (Fig. 2.11). Se tiene una gama variada en tipo de suelos, aunque en baja proporción (Tabla 2.4), siendo los Fluvisoles y Solonchak de distribución más limitada. En las montañas y lomeríos predominan los suelos someros (10-30 cm), de texturas medias y finas, con pendientes moderadas a fuertes (5°-30°) y poco fértiles, en tanto que en los valles y llanuras son delgados (30-50 cm) y profundos (≥ 50 cm), de texturas medias, finas y gruesas, y más fértiles (Priego *et al.*, 2015).

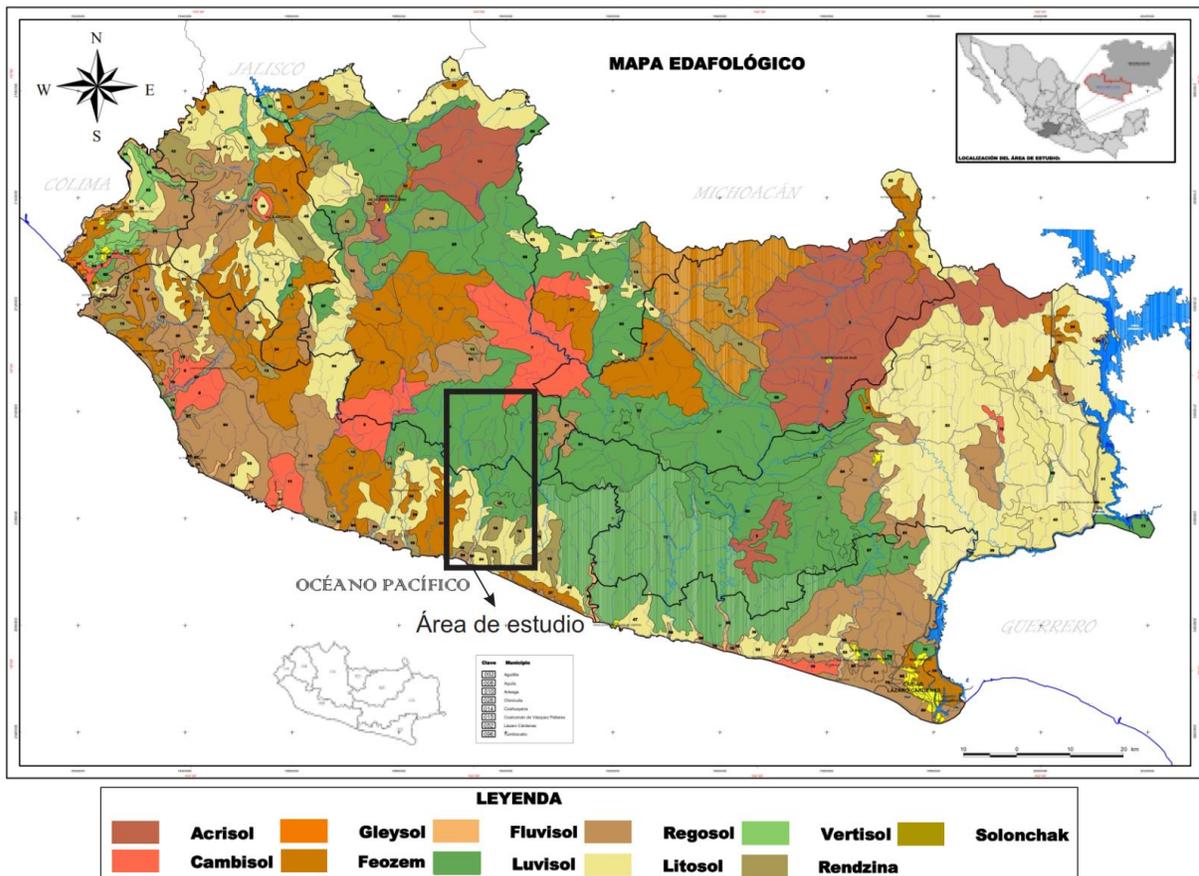


Figura 2.11. Suelos de la Sierra-Costa michoacana. El área de estudio se distingue con el rectángulo negro. Se aprecia que en el área de estudio predominan los suelos luvisoles. Fuente: modificado de Priego *et al.*, 2015.

Tabla 2.4. Suelos de la región Sierra-Costa de Michoacán (Priego et al., 2015).

Edafología	Área (km²)
Luvisol	3,907.9
Leptosol (otros)	3,169.9
Phaeozem	2,193.5
Regosol	1,770.7
Acrisol	1,226.9
Cambisol	614.6
Leptosol Réndzico	488.2
Vertisol	152.3
Fluvisol	86.3
Gleysol	7.0
Solonchak	3.0

2.6. Hidrología

La Sierra-Costa de Michoacán, de acuerdo a la Red Hidrográfica escala 1:50,000, edición 2.0, realizada por el INEGI (2010), pertenece a la Región Hidrográfica RH17 “Costa de Michoacán”. Esta cubre el 15.44% del territorio estatal, drenando las aguas del sur de la entidad directamente al océano Pacífico. Son más de cincuenta los ríos y arroyos que desembocan en este océano, todos se originan en la sierra Madre del Sur y fluyen en una dirección de norte a sur; sus cuencas son de relieve accidentado por lo que es escaso el aprovechamiento del agua para actividades agrícolas (INEGI, 2007). Los ríos que drenan hacia la costa de Michoacán son el río Coahuayana, Ostula, Coalcomán, El Águila, El Cachán, Tupitina, Nexpa, El Cuilalá y El Huahua, también hay algunos arroyos: Arroyo Seco, Pomero, Teolán, Popoyuta, El Cayaco, El Zapotán, Ashotán y Ticuiz. El cuerpo de agua costero más importante es el estero Mezcala, con las lagunas Los Tules, Mezcala y Colorada que forman un área natural protegida. La cuenca Huahua está dentro de la Cuenca Hidrográfica RH17B “Cachán o Coalcomán y otros” y Subcuenca Hidrográfica RH17Ba “Mameyera y Tupitina” (Fig. 2.12) (INEGI, 2010).

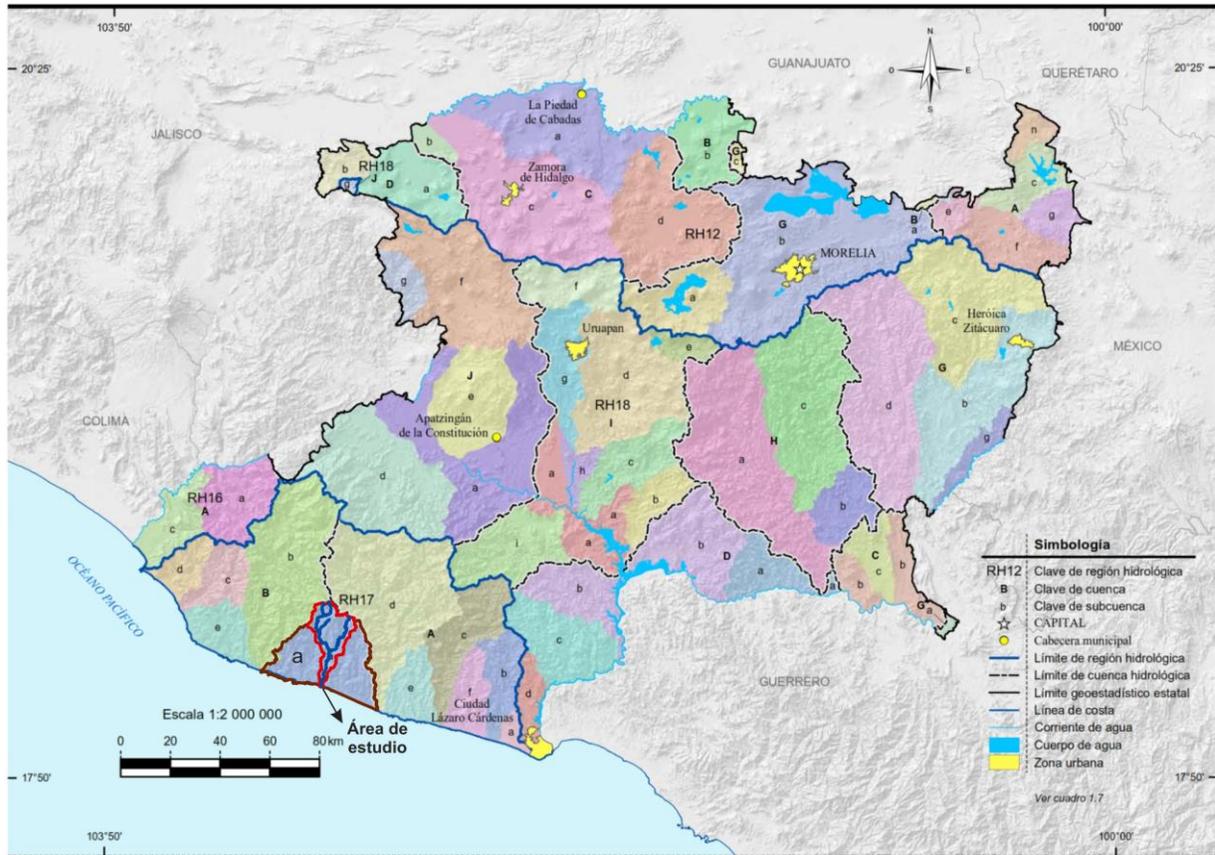


Figura 2.12. Regiones, cuencas y subcuencas hidrológicas del estado de Michoacán. El área de estudio (contorno rojo) se localiza dentro de la Subcuenca Hidrográfica RH17Ba “Mameyera y Tupitina” (contorno café). Fuente: modificado de INEGI. Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo 2017.

2.7. Cobertura vegetal y uso de suelo

En general, la región Sierra-Costa de Michoacán cuenta con una dominancia de las coberturas de bosque y selva, 35.21% y 45.3% respectivamente (Tabla 2.5); pero son las de tipo antrópico o secundarizadas las más dominantes. Las selvas son las coberturas más afectadas por procesos de secundarización, con un 25.6% de su cobertura alterada en relación al 19.0% que presentan los bosques.

En general, la vegetación se encuentra distribuida en un gradiente que va de la sierra, con dominancia de bosques de coníferas y latifoliadas, hasta la costa, donde se encuentran más

comúnmente zonas de selvas y vegetación hidrófila (Fig. 2.13). Las coberturas antrópicas están dispersas en todo el territorio (Medina *et al.*, 2015).

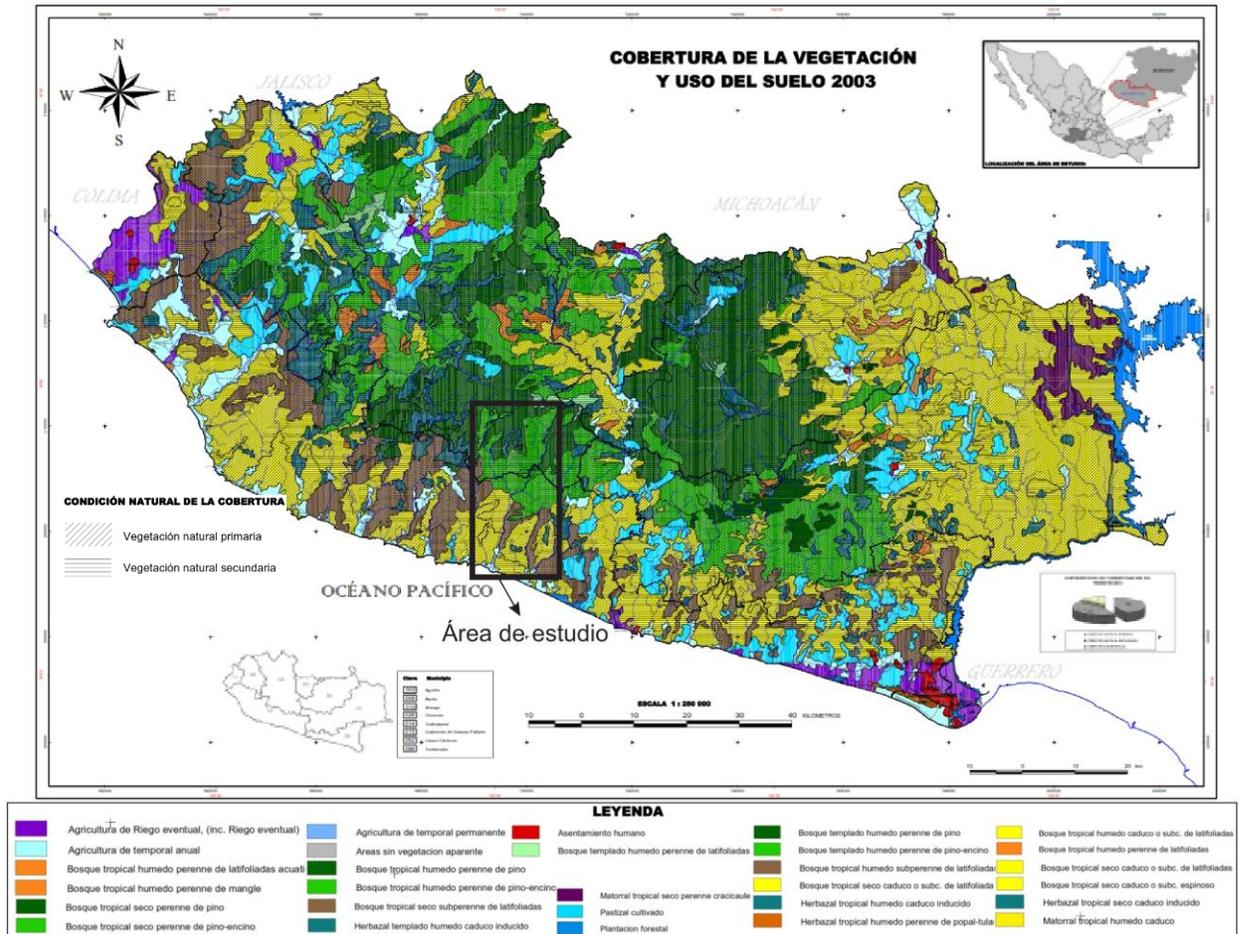


Figura 2.13. Uso de suelo de la Sierra-Costa michoacana. El área de estudio se distingue con el rectángulo negro. Se aprecia que en el área de estudio predomina el bosque tropical seco perenne de pino-encino y el bosque tropical seco caduco espinoso. Fuente: modificado de Priego *et al.*, 2015.

Tabla 2.5. Superficie de los diferentes tipos de coberturas encontrados en la región Sierra-Costa de Michoacán (Medina et al., 2015).

Cobertura/Tipo	Área en km ²	Área en %
Selva caducifolia y subcaducifolia	482,889.2	35.2
Bosque de coníferas	225,810.6	16.4
Bosque de coníferas y latifoliadas	204,403.1	14.9
Agricultura de temporal	156,515	11.4
Selva perenne y subperennifolia	112,148.1	8.2
Pastizales inducidos y cultivados	94,441.8	6.9
Bosque de latifoliadas	50,040.1	3.6
Agricultura de riego y humedad	30,355	2.2
Cuerpo de agua	7,112.8	0.5
Asentamiento humano	4,943	0.4
Bosque mesófilo de montaña	2,894.2	0.2
Vegetación hidrófila	1,877.1	0.1

2.8. Sistema socio-demográfico y socio-económico

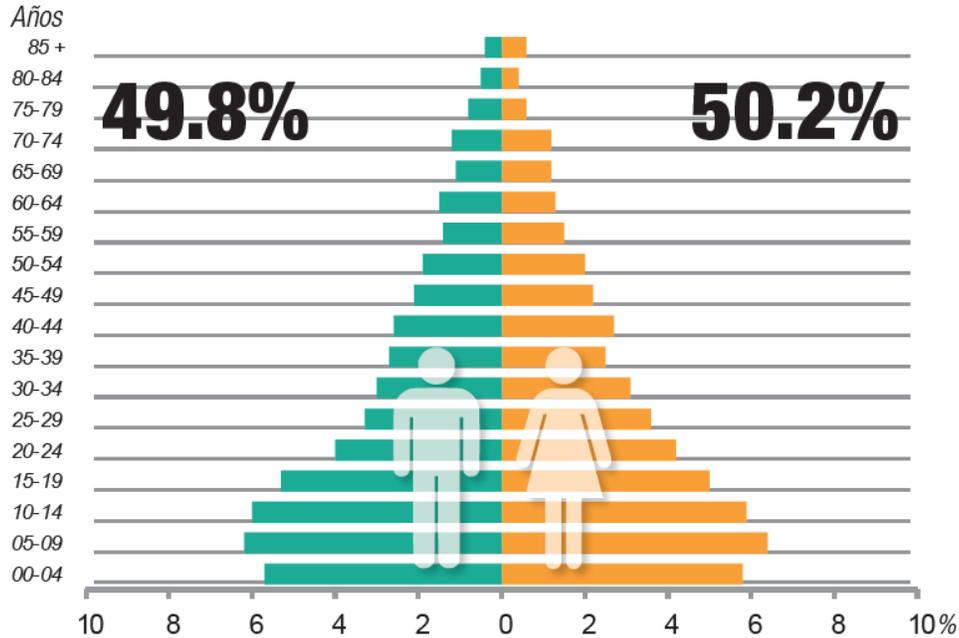
Con el objetivo de conocer, de manera general, el volumen, la composición y distribución de la población y de las viviendas de los municipios que conforman la cuenca Huahua, en este apartado se presenta una síntesis de datos relevantes sobre las características demográficas, sociales y económicas básicas de la población y las viviendas de los municipios de Aquila y Coalcomán, Michoacán, que son en los que se localiza la cuenca Huahua.

2.8.1. Aquila

Población

En el municipio de Aquila el total de población en 2015, fue de 24,864 habitantes; de los cuales, 12,488 son mujeres y 12,376 hombres. En cuanto a edad, la mitad de la población tiene 22 años o menos (Grafica 2.1) y la razón de dependencia por edad es de 78.6 (existen 78 personas en edad de dependencia por cada 100 en edad productiva).

Considerando que este municipio tiene 2,312 km² de superficie, la densidad de población es de 11 habitantes por km².



Grafica 2.1. Pirámide de sexo y edades. Se observa que la relación de hombres-mujeres es de 99.1, es decir hay 99 hombres por cada 100 mujeres. Fuente: Encuesta Intercensal (EIC), 2015.

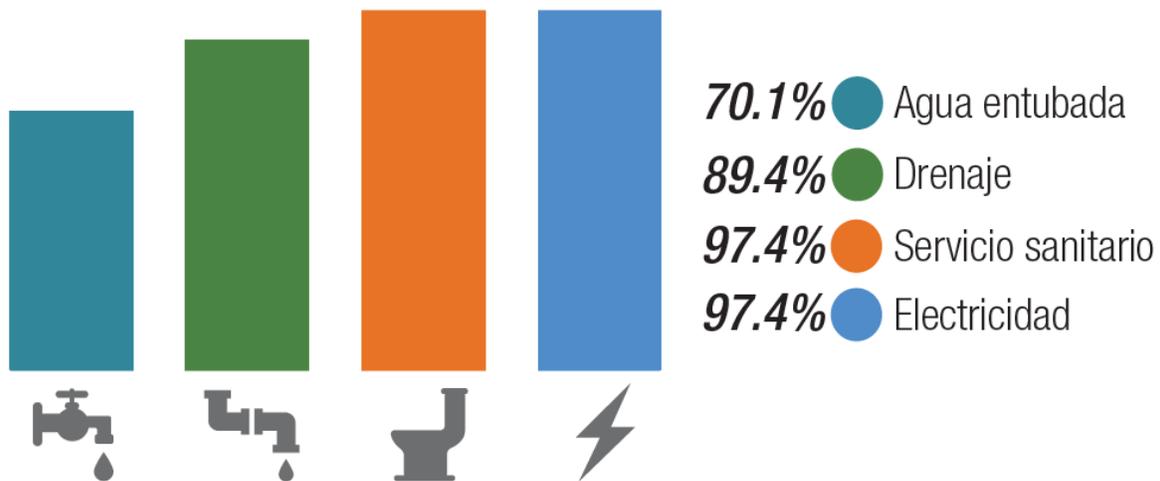
De las 631 localidades del municipio, registradas en el Catálogo Único de Claves de Áreas Geoestadísticas, Estatales, Municipales y Localidades presentado por el INEGI, en 2015, solamente 45 tienen una población mayor a 100 habitantes. Específicamente en la cuenca Huahua, la localidad de Huahua tiene una población de 275 habitantes, el resto de las localidades cuentan con una población menor a 60 personas.

Del total de la población, en el año 2015, el 77.86% se considera indígena. Sólo el 38.86% habla alguna lengua indígena; y el 0.03% de los hablantes de esta lengua no hablan español. Según los resultados estadísticos del Censo de Población y Vivienda (CPyV) 2010, la población indígena del municipio se distribuye en un total de 13 localidades que concentran el 50% de la población con adscripción étnica: Pomaro, Santa María de Ostula, Cachán de Echeverría, Maruata, La Ticla, El Duín, San Pedro Naranjestil, La Mina de la Providencia, La Cofradía de Ostula, Tizupan, La Labor, El Faro de Bucerías e Ixtapilla (Juárez, 2017). Ninguna de éstas se encuentra dentro de la cuenca Huahua.

Vivienda

En materia de vivienda, hay 5,776 viviendas particulares habitadas (incluye las siguientes clases de vivienda: cuarto en la azotea de un edificio, local no construido para habitación, vivienda móvil y refugio) donde, en promedio, hay 4.3 ocupantes por vivienda y 1.6 ocupantes por cuarto.

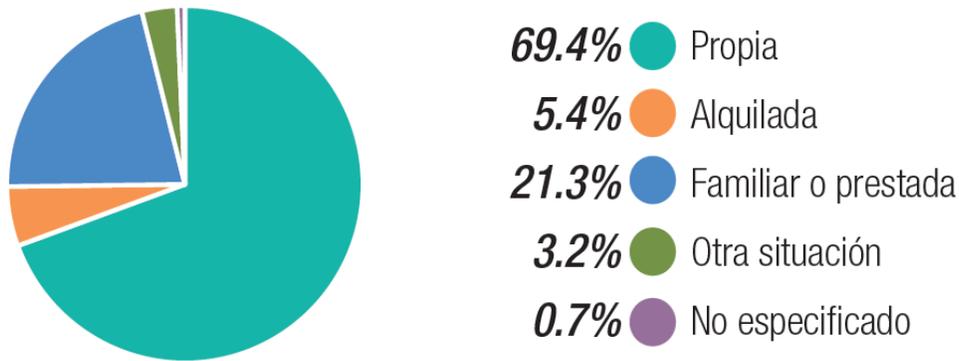
En las siguientes Graficas (Gráficas 2.2, 2.3 y 2.4) se muestra la situación en cuanto a servicios, construcción y tenencia de las viviendas en el municipio.



Grafica 2.2. Disponibilidad de servicios en la vivienda. Se muestra en valores porcentuales los servicios con los que cuentan las viviendas del municipio de Aquila. Fuente: EIC, 2015.



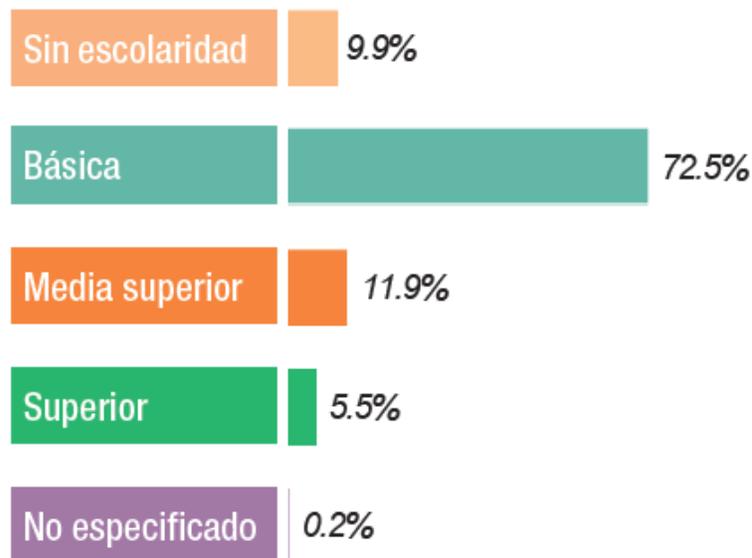
Grafica 2.3. Viviendas con materiales de construcción precarios. Se puede apreciar que el 31.1 de las viviendas están construidas con materiales precarios. Fuente: EIC, 2015.



Grafica 2.4. Tenencia de la vivienda. Se puede observar que más de la mitad de la población tiene casa propia. Fuente: EIC, 2015.

Características educativas

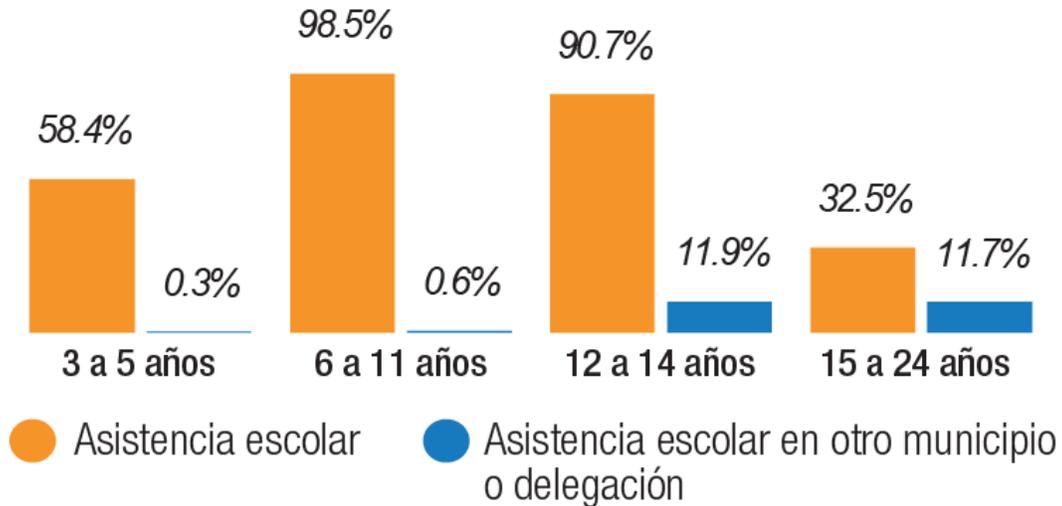
En el municipio de Aquila la población de 15 años y más, en su mayoría, para 2015, tenía un nivel de escolaridad básico (72.5%) y sólo el 5.5% tiene el nivel superior (Grafica 2.5). La tasa de alfabetización por grupos de edad, en el mismo año, fue de: 98.5% de 15 a 24 años y 87.8% de 25 años y más.



Grafica 2.5. Población de 15 años y más según nivel de escolaridad. Se observa que la mayoría de la población no cuenta con una carrera profesional. Fuente: EIC, 2015.

La población que mayormente se inscribe y acude regularmente como estudiante o alumno a un centro de enseñanza del Sistema Educativo Nacional o su equivalente, son personas de 6 a 11 años (98.5%) y de 12 a 14 años (90.7%) (Grafica 2.6).

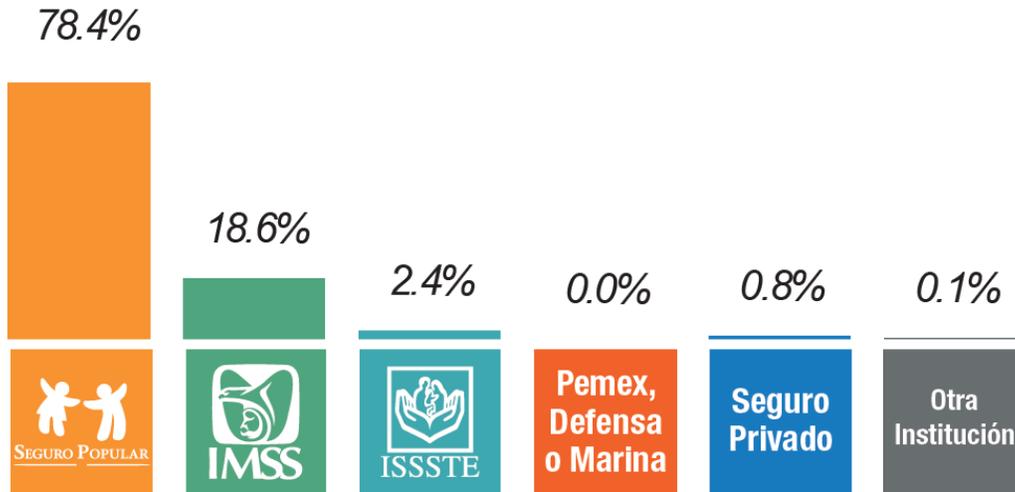
Para 2015 se reportaron 31 escuelas prescolares indígenas en el municipio, en las cuales hubo un total de 1,094 alumnos y 42 escuelas primarias indígenas con 2,125 alumnos totales.



Grafica 2.6. Asistencia y movilidad escolar por grupos de edad. Se puede apreciar que la mayoría de la población recibe asistencia escolar en el municipio, sin embargo, una parte importante de la población, que aun asiste a la escuela, entre los 15 a 24 años acuden a otro municipio. Fuente: EIC, 2015.

Salud

En el año 2015, el 86.3% de la población del municipio de Aquila estaba afiliado a uno o más servicios de salud, destacando el Seguro Popular con un 78.4% (Grafica 2.7).



Grafica 2.7. Afiliación a servicios de salud. Se muestran los principales centros de servicios de salud a los que acude la población del municipio. Fuente: EIC, 2015.

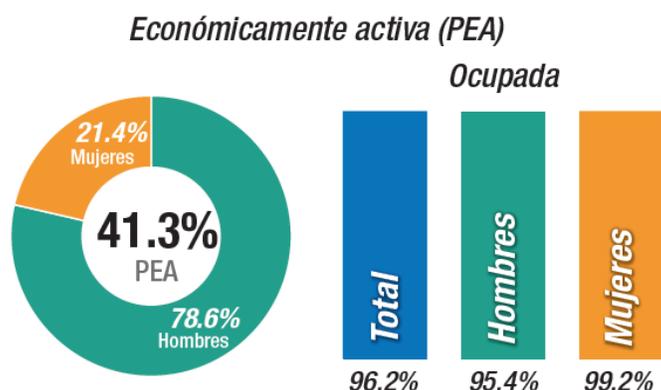
En cuanto a infraestructura de servicios de salud, el municipio cuenta con un total de 23 unidades médicas, distribuidas de la siguiente manera: nueve unidades médicas IMSS (Instituto Mexicano del Seguro Social) Oportunidades, una unidad médica ISSSTE (Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado), once de la Secretaría de Salud Estatal y dos unidades médicas no especificadas. En la cabecera municipal se encuentra una clínica de tercer nivel que atiende mayormente emergencias, pues no cuenta con capacidad de hospitalización. Los pacientes que requieren atención especializada son canalizados hacia Coahuayana y Tecomán, en el estado de Colima (Juárez, 2017).

La demanda de medicinas actualmente es otro de los rezagos en las distintas localidades del municipio, pues ésta es atendida por las clínicas adscritas a la Secretaría de Salud y el Programa de Ampliación de Cobertura (PAC) que atiende las comunidades rurales en donde no existe el servicio médico, pero la cobertura no es suficiente. Hay servicios de farmacias sobre todo en las comunidades más grandes, pero en las poblaciones más alejadas de la cabecera municipal es complicado encontrar medicamentos (Juárez, 2017).

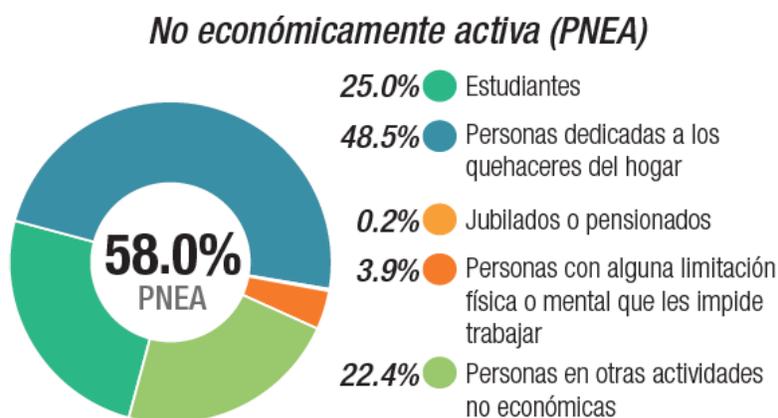
Características económicas

De acuerdo con la Encuesta Intercensal, 2015, el 41.3% de la población es económicamente activa, es decir, personas de 12 y más años de edad que tuvieron vínculo con la actividad económica o que lo buscaron en la semana de referencia (Grafica 2.8).

Respecto a la Población No Económicamente Activa (PNEA) hay un registro del 58%, del cual un 48.5% son personas dedicadas a los quehaceres del hogar y un 25% son estudiantes (Grafica 2.9).



Grafica 2.8. Características económicas. Se puede observar que del total de la Población Económicamente Activa (PEA), el 96% se encuentra en condición de ocupada. Fuente: EIC, 2015.



Porcentaje de la población de 12 años y más con condición de actividad no especificada 0.7.

Grafica 2.9. Características económicas. Se muestran las actividades de la PNEA. Fuente: EIC, 2015.

Por otro lado, las economías de subsistencia, en general, son actividades de tipo pesquero, agrícola, pecuarias, de caza y recolección.

De acuerdo con el plan de desarrollo municipal 2015-2018, publicado en el periódico oficial del gobierno constitucional del estado de Michoacán de Ocampo, la actividad agrícola del municipio se sostiene en gran parte por técnicas de temporal de riego, teniendo como cultivos principales el maíz de grano, los pastos, la papaya, la copra, el tamarindo; y en menor medida el ajonjolí, aguacate, frijol, jamaica, limón, mango, jitomate, tomate, sorgo forrajero y sorgo en grano (Juárez, 2017). Cabe aclarar que la superficie destinada a la actividad agrícola del municipio es muy pequeña, según datos del INEGI (2009) solo el 4.73%.

El agua que se emplea para el riego de los campos agrícolas es tomada, principalmente, de arroyos, ríos, barrancas, manantiales y norias localizadas a lo largo del territorio municipal, lo cual permite que la mayor parte de riego se realice con agua a través de canales hechos de tierra (Juárez, 2017).

Respecto a la ganadería, aunque hay un enfoque de producción de carne porcina y bovina, la mayoría de la gente prefiere el autoconsumo y como medio de tradición y transporte (Juárez, 2017).

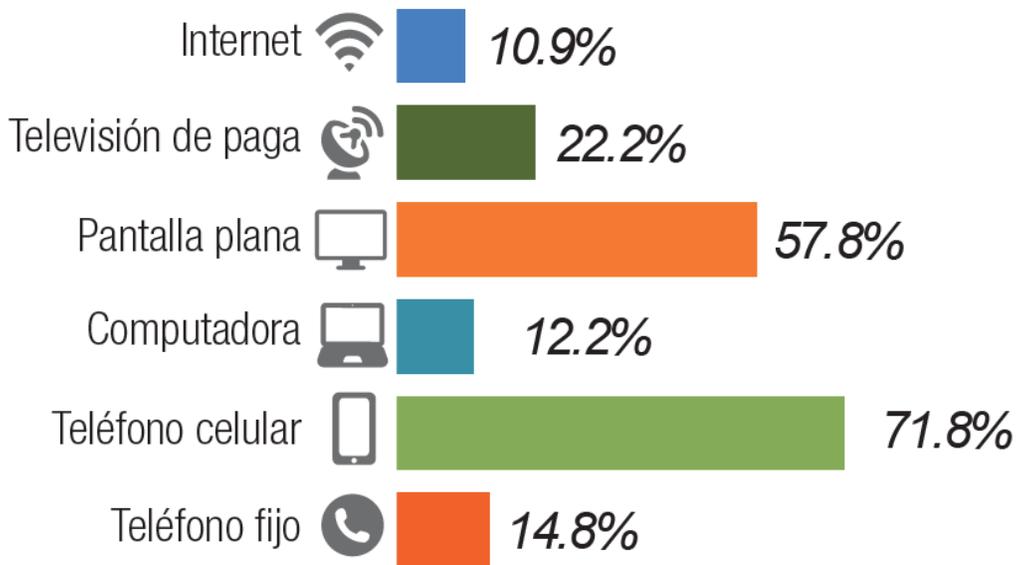
En Aquila, la actividad pesquera ahora tiene serias limitaciones por la falta de infraestructura, capacitación, asistencia técnica especializada y de financiamiento. Su nivel de comercialización es muy bajo, pues sólo representa el 7% de la captura total en el estado; esto se debe a que la gran mayoría de organizaciones pesqueras viven en comunidades dispersas, sin servicios y con bajo grado de escolaridad, distribuidos a lo largo de la costa de Aquila y considerados como de alta y media marginación (Juárez, 2017).

Finalmente, una de las actividades que ayuda un poco a la economía del municipio es la minería. Según el Ordenamiento Ecológico para el estado de Michoacán en 2016, las principales minas en explotación de minerales metálicos y no metálicos se encuentran en las regiones Sierra Costa, Tierra Caliente y Oriente (Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Cambio Climático, SEMARNAC, 2016).

Respecto a lo anterior, Aquila pertenece al distrito minero La Minita, en el cual, las sustancias que se extraen son: Hierro (Fe), Plata (Ag), Oro (Au), Cobre (Cu) y Manganeseo (Mn); siendo Aquila y San Pedro las zonas mineralizadas (SEMARNAC, 2016).

Comunicación y vialidad

La condición de disponibilidad de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en los hogares, según datos de la EIC 2015, se muestran en el Grafica 2.10.



Grafica 2.10. Disponibilidad de TIC. Se puede observar que la mayoría de las viviendas cuenta con teléfono celular. Fuente: EIC, 2015.

En cuanto a vialidades, en el municipio de Aquila se encuentran: una red carretera principal o primaria de 156 km pavimentada, 30 km de carreteras secundarias pavimentadas y un total de 66 km correspondientes a caminos rurales, de los cuales sólo 25 km están pavimentados, el resto cuentan con revestimiento (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT Michoacán, 2016).

Seguridad

El plan de desarrollo municipal 2015-2018, publicado en el periódico oficial del gobierno constitucional del estado de Michoacán de Ocampo, reconoce que “uno de los grandes problemas del municipio de Aquila es la inseguridad y la inestabilidad. Durante los últimos años se han experimentado escaladas de conflicto social, principalmente derivados de la penetración de grupos del crimen organizado en los territorios y la vida cotidiana de la población, lo que conlleva amenazas a su vida y a los recursos naturales del entorno” (Juárez, 2017, p.11).

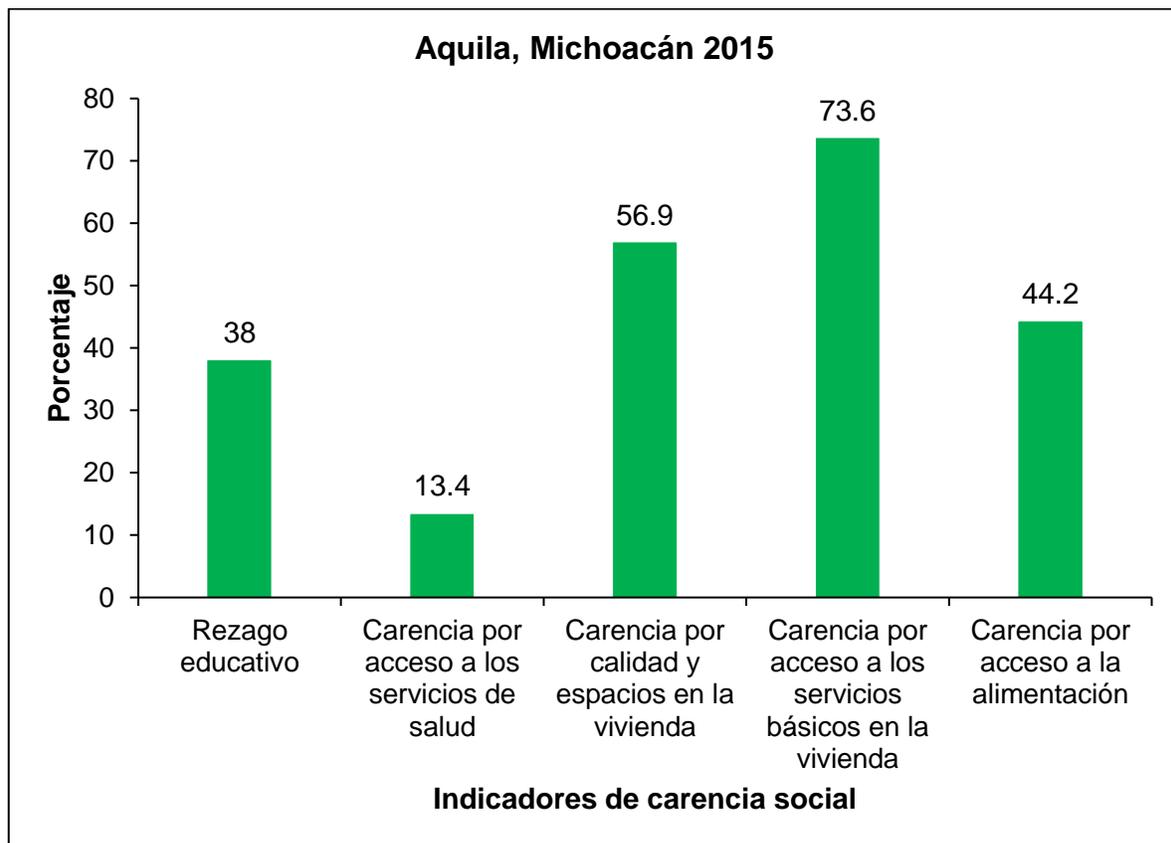
En dicha publicación, se menciona que el municipio de Aquila no cuenta con un cuerpo de policía constituido, por lo que la mayor parte de las cuestiones referentes a seguridad pública, son atendidas desde la fuerza estatal o federal. Además, para 2017, existía un pacto informal mediante el cual la población, principalmente indígena, ha desarrollado instituciones informales y comunitarias para proteger el medio ambiente y la seguridad de los pobladores. No se tiene un registro de los elementos, ni materiales para operar con los que cuentan estos cuerpos de seguridad, y de hecho son fuente de conflicto intermitente con los poderes estatales (Juárez, 2017).

Por otro lado, “en materia de las actividades preventivas y de atención a riesgos no asociados con la criminalidad, son un área escasa de atención en el municipio. En cuanto a Protección Civil se registran rezagos, como la falta de un cuerpo de bomberos y servicios de paramédicos. Si bien se cuenta con un grupo oficial de Protección Civil, éste está compuesto por sólo tres personas, quienes cuentan con una ambulancia para operar, pero requieren de mayor equipamiento, y, sobre todo, capacitación. En este campo, nuevamente es el tejido asociativo y la participación ciudadana lo que permite cubrir las necesidades en materia de protección de riesgos, pues en lo que se refiere a siniestros, es la población organizada la que permite cubrir tareas de atención a daños y afectados” (Juárez, 2017, p. 11).

Situación de pobreza y rezago social

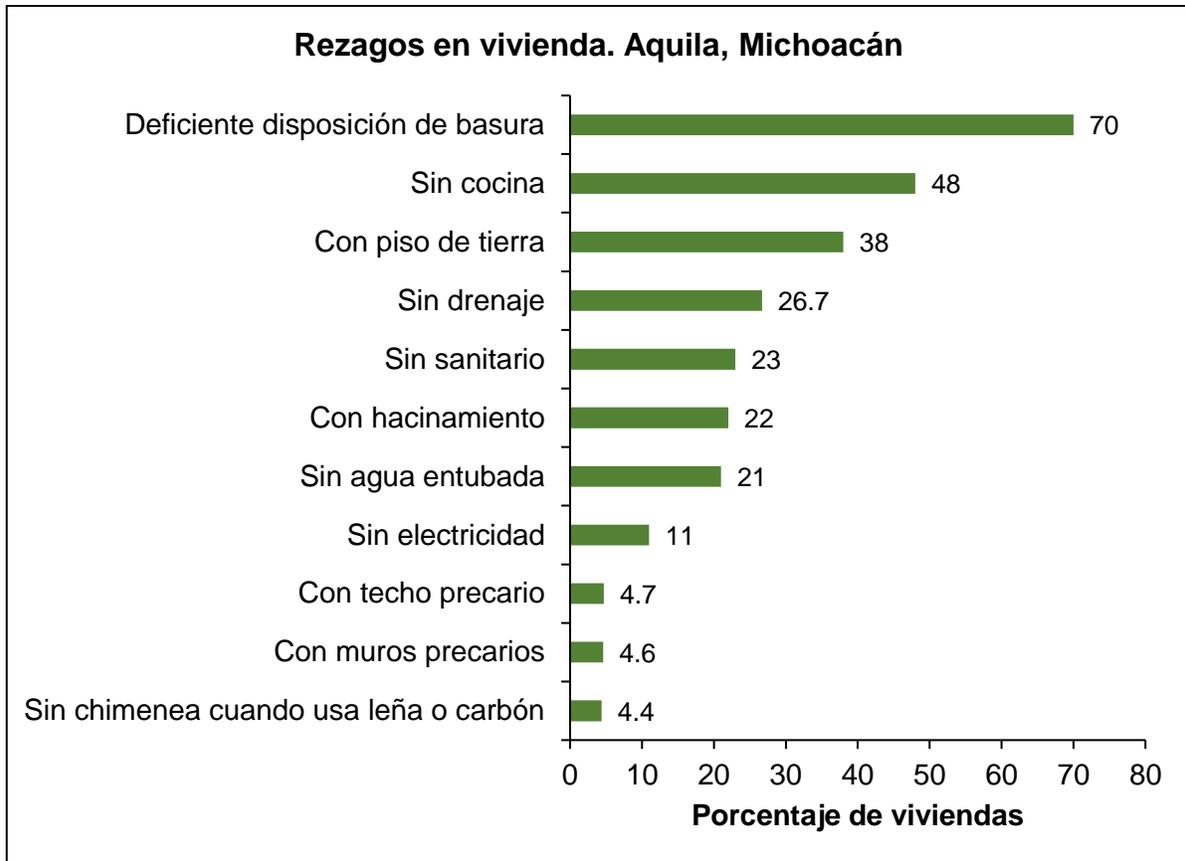
El Informe Anual sobre la Situación de Pobreza y Rezago Social en Aquila, Michoacán, para el año 2015, coloca al municipio en un grado de rezago social alto. A continuación, se muestran los indicadores de carencias sociales que califican a dicho municipio en este estatus.

Para el año 2015, la carencia por acceso a los servicios básicos en la vivienda, es el indicador que más afecta a la población (Grafica 2.11).



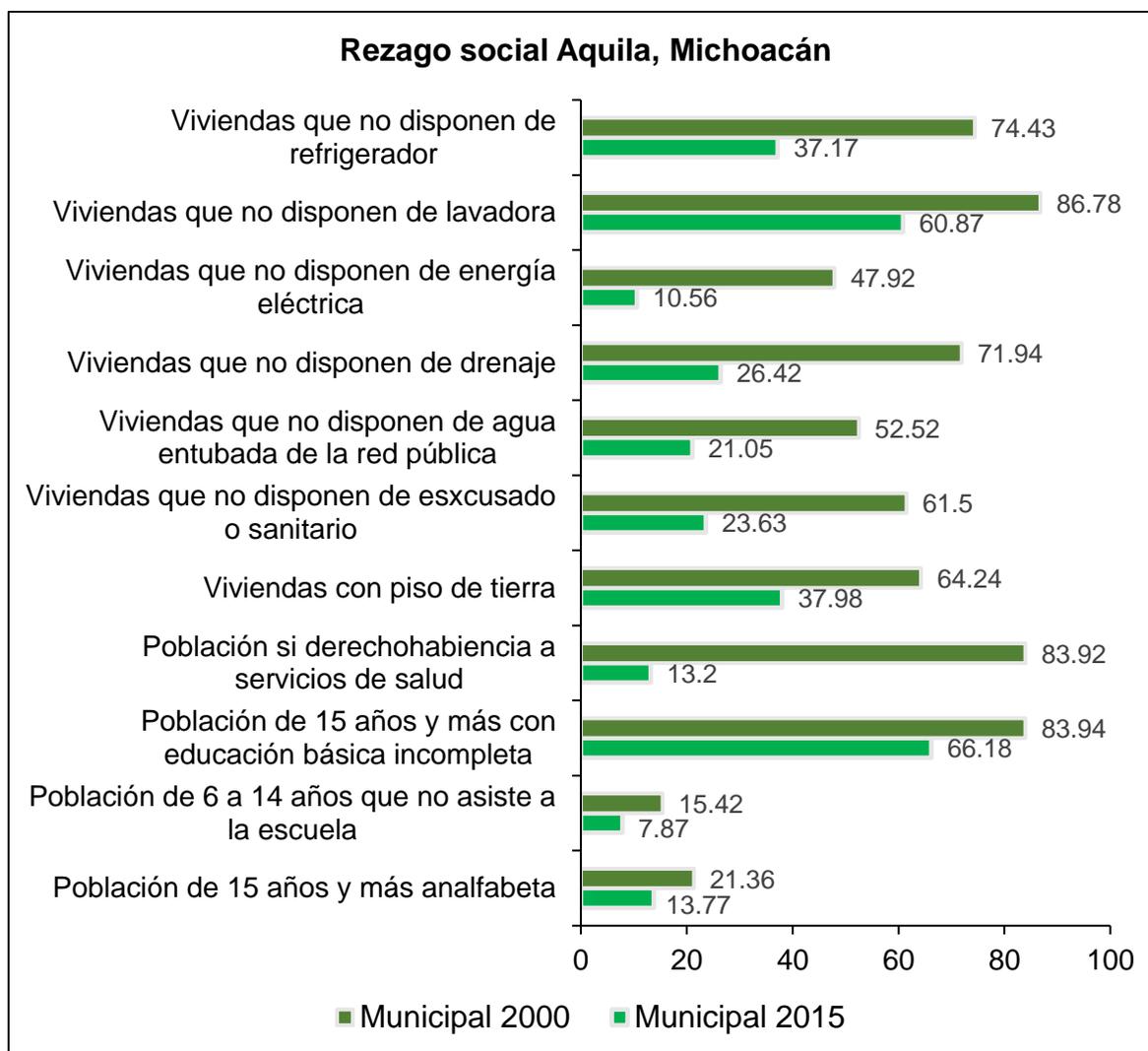
Grafica 2.11. Indicadores de carencias sociales para el año 2015 en Aquila, Michoacán. Se puede detectar que las carencias más importantes de la población son respecto a la vivienda. Fuente: modificado de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) con datos de la EIC 2015.

Los principales rezagos de las viviendas en el municipio se presentan en la Grafica 2.12.



Grafica 2.12. Principales rezagos de las viviendas en el municipio. Se aprecia que el mayor rezago corresponde a la deficiente disposición de basura. Fuente: elaboración de la SEDESOL con datos del Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL) y del INEGI, año 2015.

De acuerdo con datos del CONEVAL, de 2000 a 2015, el municipio pasó del lugar 112 al 113 en la escala estatal de rezago social (Grafica 2.13), esto se confirma con los resultados del Informe de pobreza y evaluación en el estado de Michoacán 2012, elaborado por el CONEVAL, ya que Aquila fue uno de los municipios que presentó grados de rezago social más altos para sus localidades en 2012.



Grafica 2.13. Comparación de rezago social entre el año 2000 y 2005 en el municipio de Aquila. Se puede apreciar que, en cuestión de educación, la mejora ha sido poca de 2000 a 2005. Fuente: modificado de la SEDESOL/DGAP (Dirección General de Análisis y Prospectiva) con información del CONEVAL.

Según los resultados del Censo de Población y Vivienda 2010, setenta localidades del municipio de Aquila se encuentran en rezago social alto o muy alto; de éstas, dos se encuentran en la cuenca Huahua (Figura 2.15), esto nos da una idea de la situación en la que se encuentra la población que habita en la cuenca.

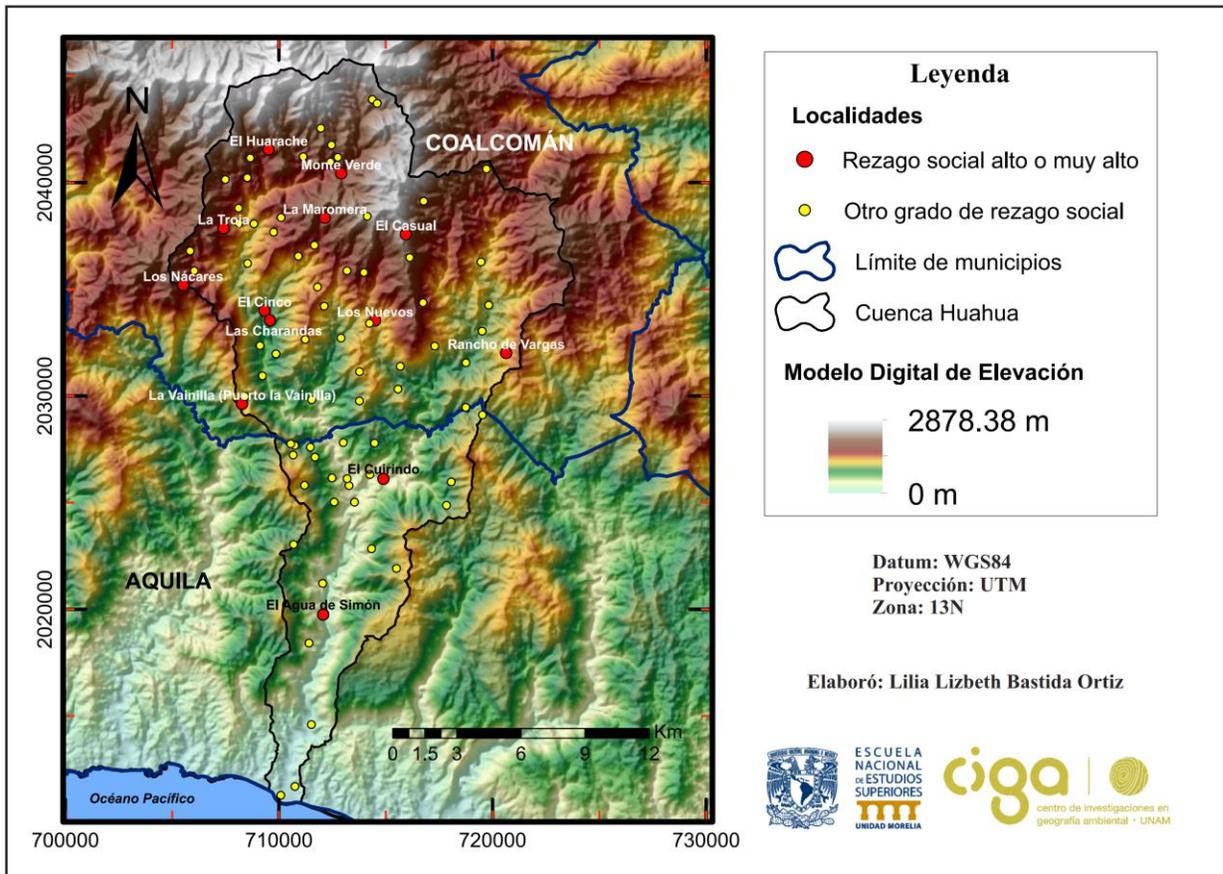


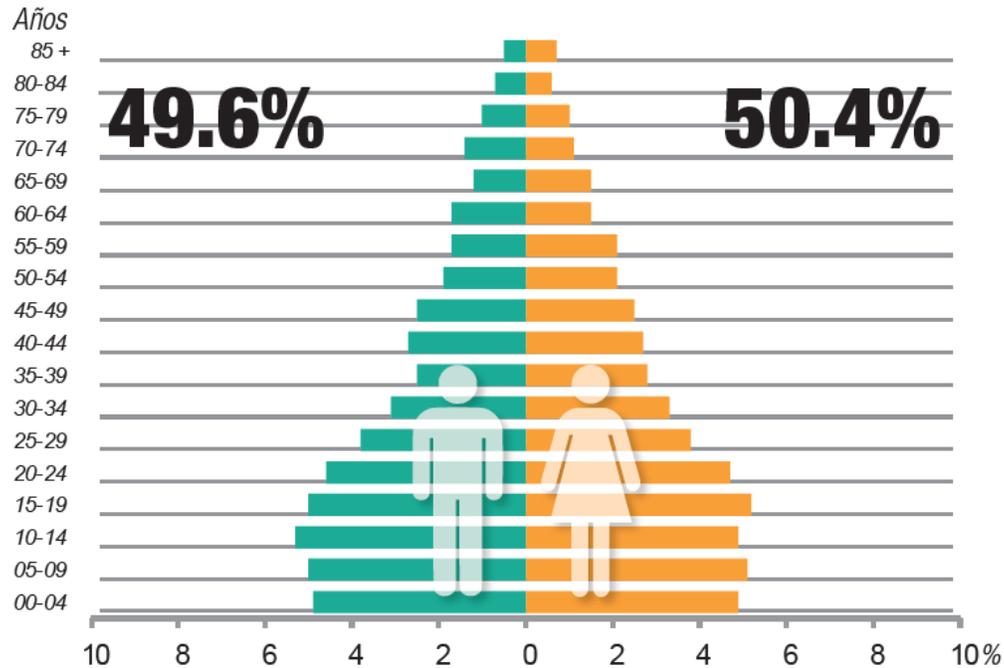
Figura 2.15. Localidades de los municipios de Aquila y Coacomán que se encuentran dentro de la cuenca Huahua. Los puntos de color rojo son localidades que, de acuerdo con los resultados del Censo de Población y Vivienda 2010, se encuentran en un rezagó social alto o muy alto.

2.8.2. Coacomán de Vázquez Pallares

Población

En el municipio de Coacomán de Vázquez Pallares el total de población en 2015, fue de 18,444 habitantes; de los cuales, 50.4% son mujeres y 49.6% hombres. En cuanto a edad, la mitad de la población tiene 25 años o menos (Gráfica 2.15) y la razón de dependencia por edad es de 66.2 (existen 66 personas en edad de dependencia por cada 100 en edad productiva).

Considerando que este municipio tiene 2,881.57 km² de superficie, la densidad de población es de 6.5 habitantes por km².



Grafica 2.15. Pirámide de sexo y edades. Se observa que la relación de hombres-mujeres es de 98.5, es decir hay 98 hombres por cada 100 mujeres. Fuente: EIC, 2015.

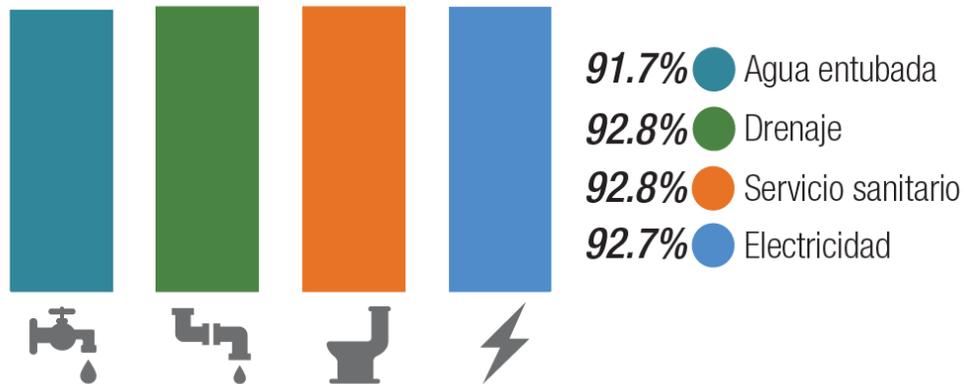
Según datos del Censo General de Población y Vivienda 2010, para ese año, señala la existencia de 56 habitantes hablantes de alguna lengua indígena, de los cuales 36 fueron hombres y 20 mujeres. Las dos principales lenguas indígenas del municipio son el náhuatl y el maya (Calderón, 2011).

Es un municipio conformado por 441 localidades, de las cuales 400 poseen menos de 50 habitantes, y sólo una (la cabecera municipal) tiene más de 5,000 habitantes (Juárez, 2018).

Vivienda

De acuerdo con la EIC (2015), en el municipio de Coacomán hay 4,826 viviendas particulares habitadas, donde en promedio, hay 3.8 ocupantes por vivienda y 1.2 ocupantes por cuarto.

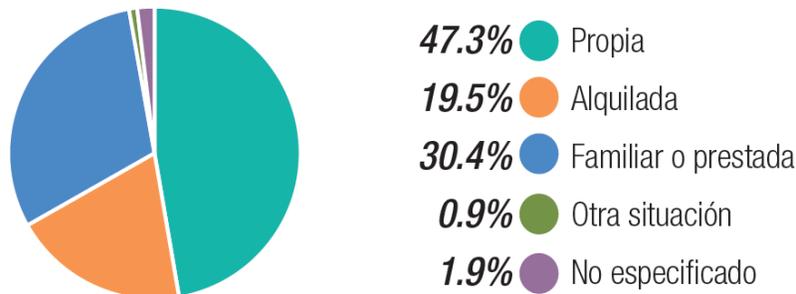
En las siguientes graficas (2.16, 2.17 y 2.18) se muestra la situación en cuanto a servicios, construcción y tenencia de las viviendas del municipio.



Grafica 2.16. Disponibilidad de servicios en la vivienda. Se muestra en valores porcentuales los servicios con los que cuentan las viviendas del municipio de Coalcomán de Vázquez Pallares. Fuente: EIC, 2015.



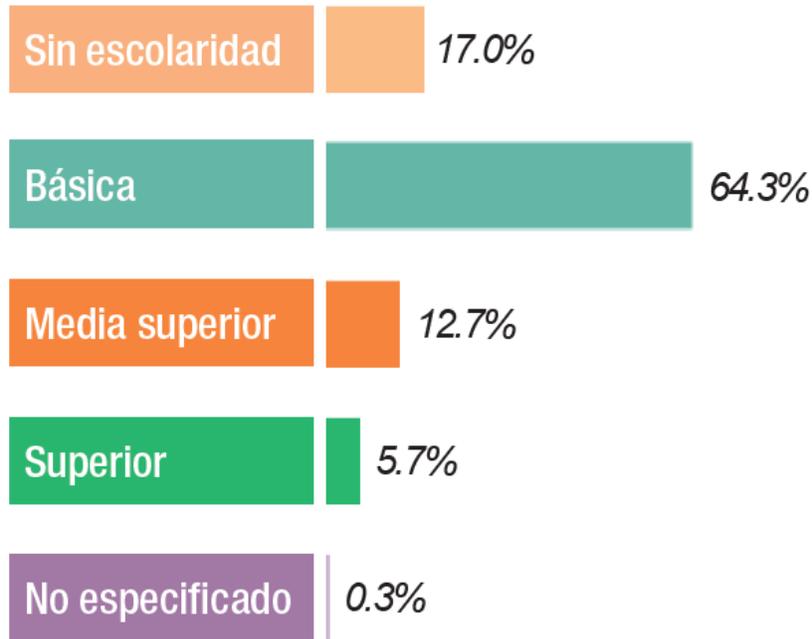
Grafica 2.17. Viviendas con materiales de construcción precarios. Se puede apreciar que el 12.7 de las viviendas están construidas con materiales precarios. Fuente: EIC, 2015.



Grafica 2.18. Tenencia de la vivienda. Se puede observar que la tenencia de la vivienda se concentra en propia y familiar o prestada. Fuente: EIC, 2015.

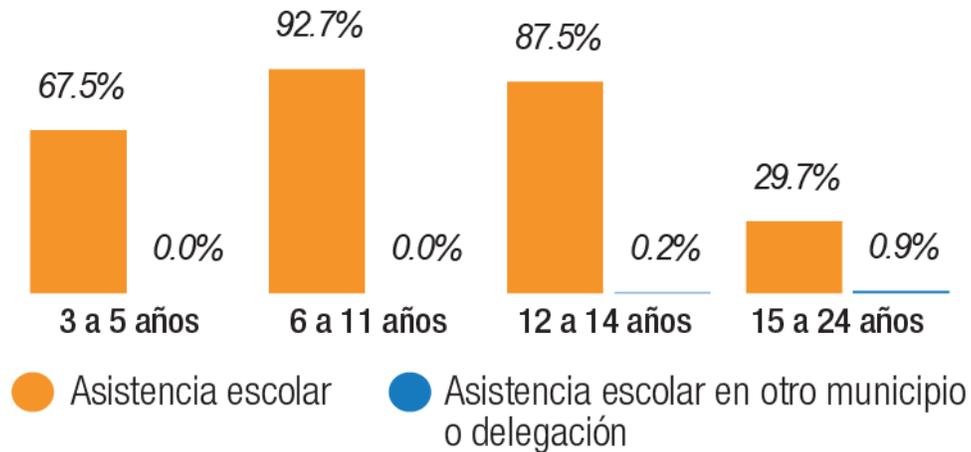
Características educativas

En el municipio la población de 15 años y más, en su mayoría, para 2015, tenía un nivel de escolaridad básico (64.3%) y sólo el 5.7% tiene el nivel superior (Gráfica 2.19). La tasa de alfabetización por grupos de edad en el mismo año fue de: 97.7% de 15 a 24 años y 85.2% de 25 años y más.



Gráfica 2.19. Población de 15 años y más según nivel de escolaridad. Se observa que la mayoría de la población no cuenta con una carrera profesional. Fuente: EIC, 2015.

La población que mayormente se inscribe y acude regularmente como estudiante o alumno a un centro de enseñanza del Sistema Educativo Nacional o su equivalente, son personas de 6 a 11 años (92.7%) y 12 a 14 años (87.5%) (Gráfica 2.20). Para 2015 no se reportan escuelas prescolares ni tampoco primarias indígenas en el municipio.

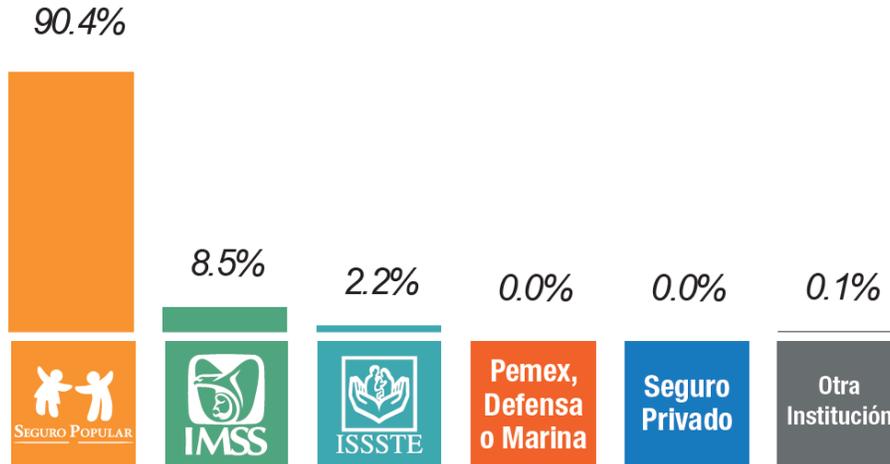


Grafica 2.20. Asistencia y movilidad escolar por grupos de edad. Se puede apreciar que la mayoría de la población recibe asistencia escolar en el municipio. Fuente: EIC, 2015.

Salud

En el año 2015, el 85.1% de la población del municipio de Coacomán de Vázquez Pallares estaba afiliado a uno o más servicios de salud, destacando el Seguro Popular con un 90.4% (Grafica 2.21).

En cuanto a infraestructura de servicios de salud, en 2018, se reportan: una Unidad Médica Familiar del IMSS, una Unidad Médica Familiar del ISSSTE, un hospital General del IMSS, un centro de Salud, una instalación del Sistema Nacional para el Desarrollo Integral de la Familia (DIF) y un centro de rehabilitación para drogadicción y alcoholismo (Juárez, 2018).

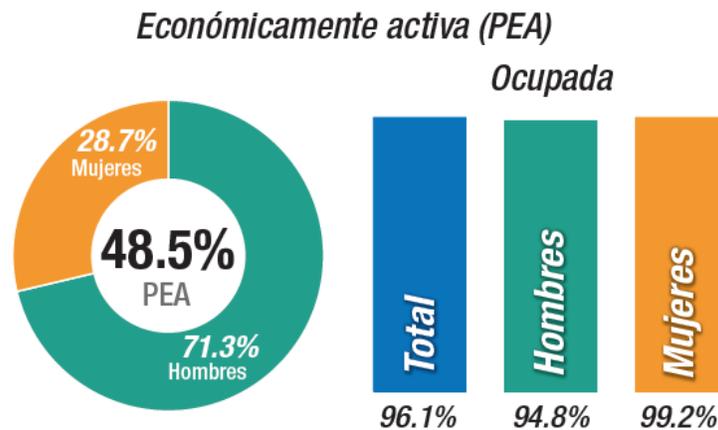


Grafica 2.21. Afiliación a servicios de salud. Se muestran los principales centros de servicios de salud a los que acude la población del municipio. Fuente: EIC, 2015.

Características económicas

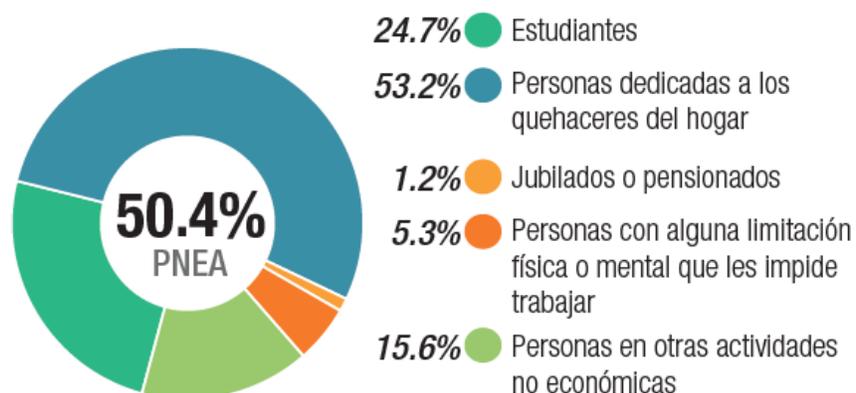
De acuerdo con la EIC (2015), el 48.5% de la población es económicamente activa (Grafica 2.22).

Respecto a la Población No Económicamente Activa (PNEA) hay un registro del 50.4%, del cual un 53.2% son personas dedicadas a los quehaceres del hogar y un 24.7% son estudiantes (Grafica 2.23).



Grafica 2.22. Características económicas. Se puede observar que del total de la Población Económicamente Activa (PEA), el 96% se encuentra en condición de ocupada.

No económicamente activa (PNEA)



Porcentaje de la población de 12 años y más con condición de actividad no especificada 1.1.

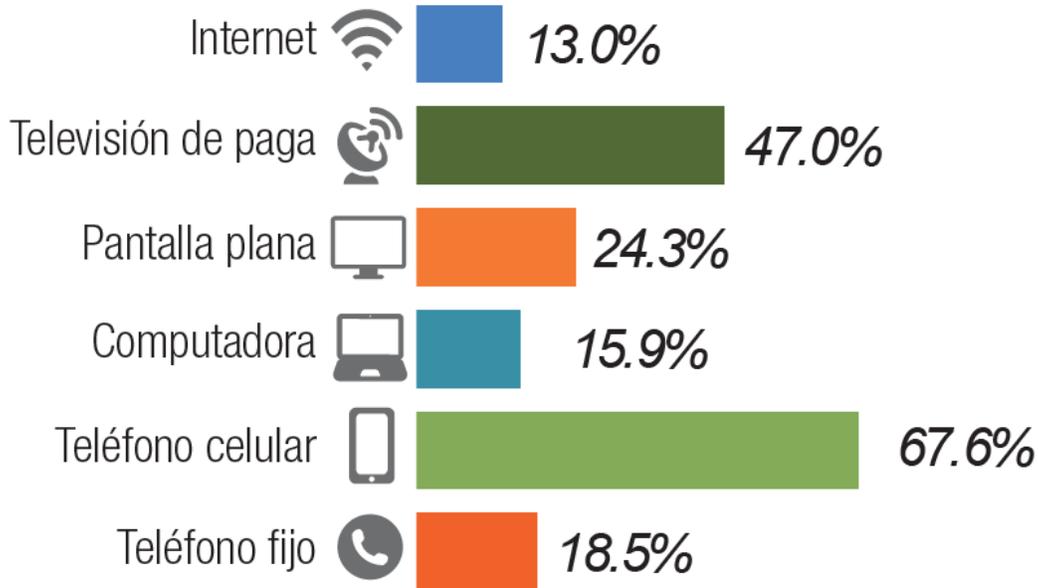
Grafica 2.23. Características económicas. Se muestran las actividades de la PNEA. Fuente: EIC, 2015.

De acuerdo con el plan de desarrollo municipal 2015-2018, publicado en el periódico oficial del gobierno constitucional del estado de Michoacán de Ocampo, el uso de suelo es primordialmente ganadero y, en menor proporción, forestal y agrícola. El cultivo que comúnmente se siembra en el municipio es el maíz, en cuanto a ganadería la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, desarrollo Rural, Pesca y Alimentación), en 2016, reporta producción de ganado de tipo: bovino, porcino, ovinos, caprinos, equinos, aves y colmenas (Juárez, 2017). Cabe aclarar que la superficie destinada a la actividad agrícola del municipio es muy pequeña, según datos del INEGI (2009) solo el 0.96%.

Al igual que Aquila, Coalcomán pertenece al distrito minero La Minita, en el cual, las sustancias que se extraen son: Cobre (Cu), Plata (Ag), Sulfato de Bario o barita ($BaSO_4$), Zinc (Zn) y Hierro (Fe); siendo La Blanca la zona mineralizada (SEMARNAC, 2016).

Comunicación y vialidad

La condición de disponibilidad de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en los hogares del municipio de Coalcomán, según datos de la EIC (2015), se muestran en la Grafica 2.24.



Grafica 2.24. Disponibilidad de TIC. Se puede observar que la mayoría de las viviendas cuenta con teléfono celular. Fuente: EIC, 2015.

En cuanto a vialidades, en el municipio de Coalcomán de Vázquez Pallares se encuentran: una red carretera secundaria pavimentada de 57 km y un total de 16 km correspondientes a caminos rurales, de estos últimos, sólo 12 km están pavimentados, el resto cuentan con revestimiento (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT Michoacán, 2016).

El municipio de Coalcomán solo cuenta con dos accesos carreteros estatales, los cuales son la carretera Coalcomán-Tepalcatepec, ésta se comunica con la ciudad de Morelia, y la carretera Coalcomán-Aguila, llamada la segunda puerta al mar que se comunica con la región de la costa michoacana (Juárez, 2016).

Seguridad

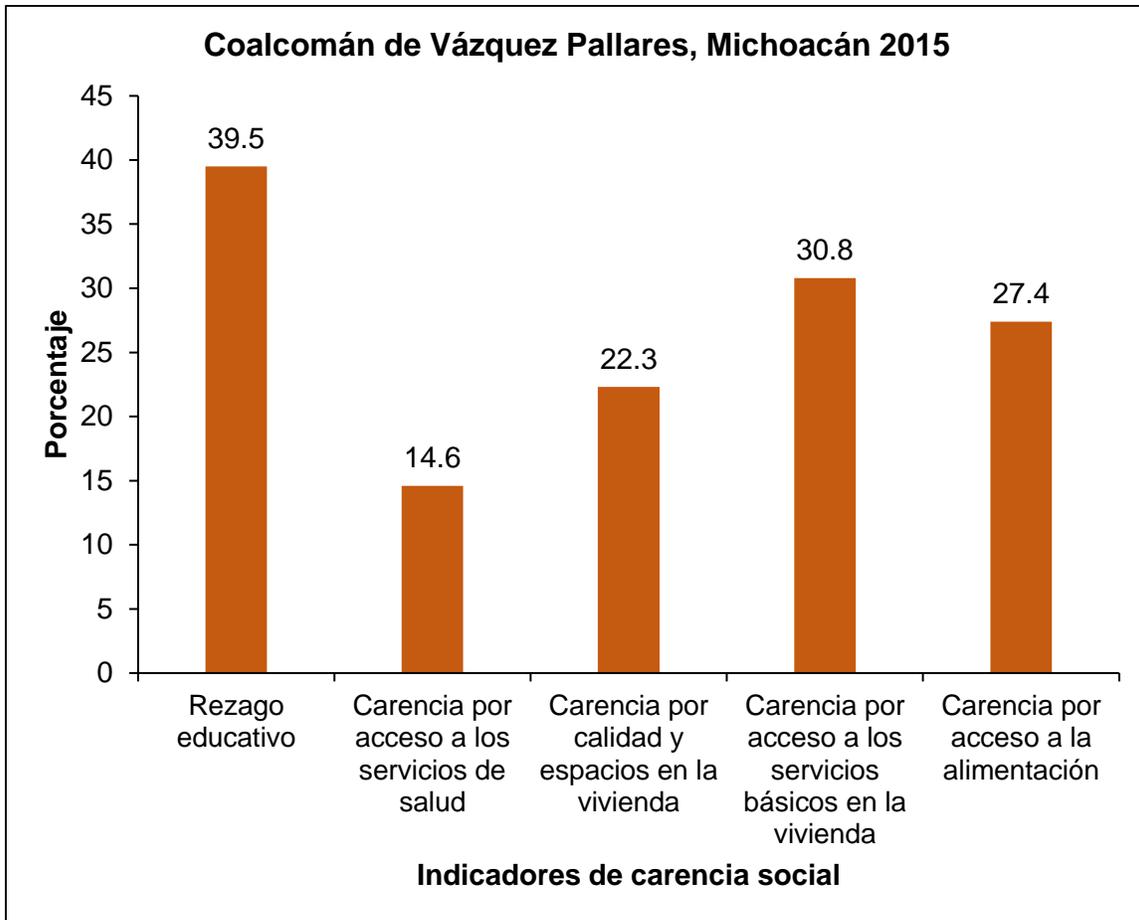
Según el Informe especial sobre los grupos de autodefensa en el estado de Michoacán y las violaciones a los derechos humanos relacionadas con el conflicto, realizado por la Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH) en 2015, reporta que Coalcomán en el periodo 2013-2014 contó con grupos de autodefensa, esto debido a la invasión de grupos de crimen organizado, quienes cometieron diversos delitos, los más recurrentes fueron los homicidios, extorsiones y secuestros.

Actualmente, respecto al tema de seguridad se siguen reportando los mismos problemas de inseguridad en el municipio.

Situación de pobreza y rezago social

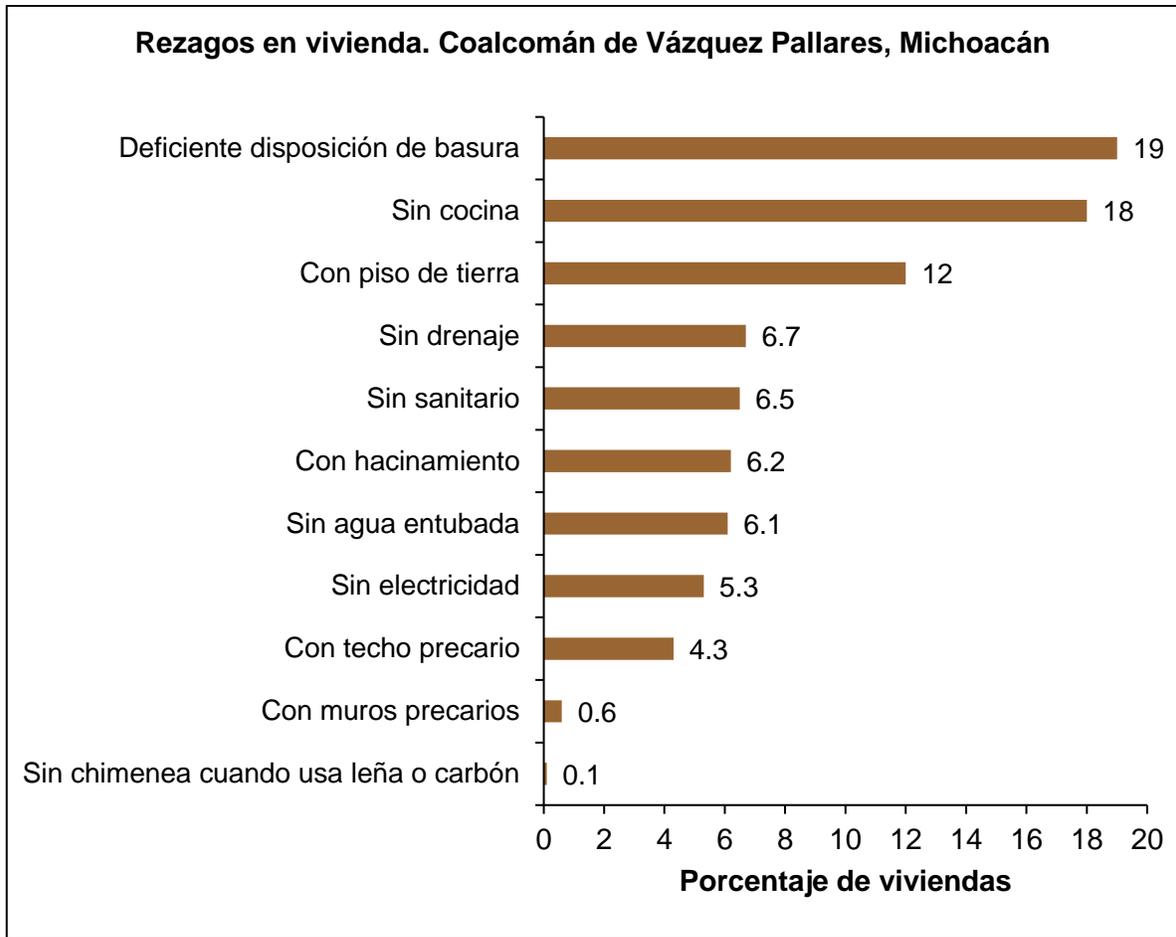
El Informe Anual sobre la Situación de Pobreza y Rezago Social en el municipio de Coalcomán de Vázquez Pallares, Michoacán, para el año 2015, se coloca en un grado de rezago social medio. A continuación, se muestran los indicadores de carencias sociales que califican a dicho municipio en este estatus.

Para el año 2015, el rezago educativo, seguido por la carencia por acceso a los servicios básicos en la vivienda, son los indicadores que más afectan a la población (Grafica 2.25).



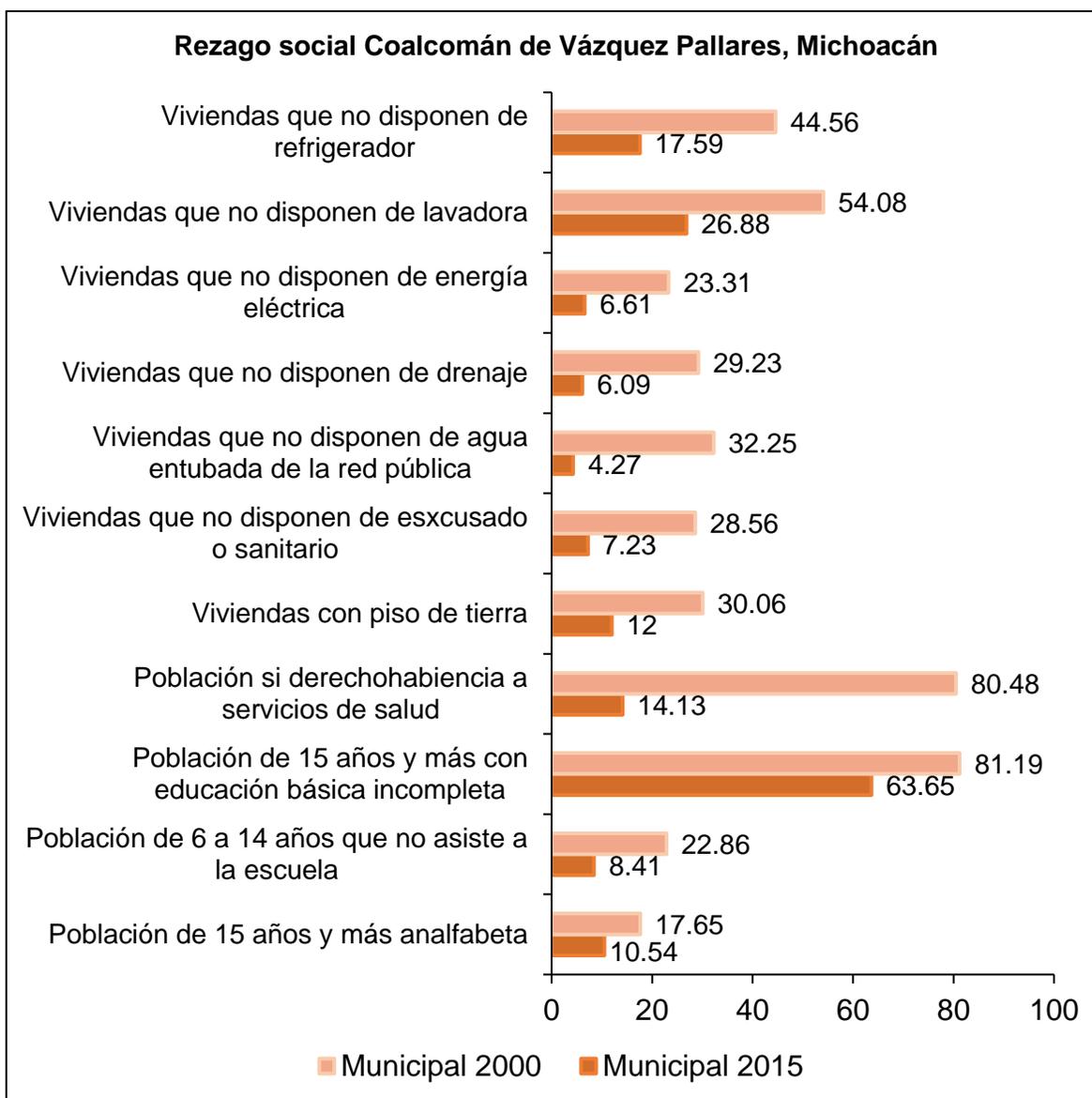
Gráfica 2.25. Indicadores de carencias sociales para el año 2015 en Coalcomán de Vázquez Pallares, Michoacán. Se puede detectar que la carencia más importante de la población es el rezago educativo. Fuente: elaboración de la SEDESOL con datos de la EIC, 2015.

Los principales rezagos de las viviendas en el municipio se presentan en la Grafica 2.26.



Grafica 2.26. Principales rezagos de las viviendas en el municipio. Se aprecia que el mayor rezago corresponde a la deficiente disposición de basura, seguido de la falta de cocina en la vivienda. Fuente: elaboración de la SEDESOL con datos del CONEVAL y del INEGI, año 2015.

De acuerdo con datos del CONEVAL, de 2000 a 2015, el municipio pasó del lugar 89 al 93 en la escala estatal de rezago social (Grafica 2.27).



Grafica 2.27. Comparación de rezago social entre el año 2000 y 2005 en el municipio de Coalcomán. Se puede apreciar que, en cuestión de educación, la mejora ha sido poca de 2000 a 2005. Fuente: modificado de la SEDESOL/DGAP con información del CONEVAL.

Según los resultados del Censo de Población y Vivienda 2010, cincuenta y siete localidades del municipio de Coalcomán se encuentran en rezago social alto o muy alto; de éstas, once se encuentran en la cuenca Huahua (Figura 2.15), esto nos da una idea de la situación en la que se encuentra la población que habita en la cuenca.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La metodología que se empleó en este trabajo consta principalmente de tres etapas: actividades preliminares (cartografía y fotointerpretación) y recopilación bibliográfica; elaboración de mapa geológico; y finalmente, preparación de insumos y modelado.

3.1. Actividades preliminares

En esta etapa se seleccionó y delimitó el área de estudio, considerando el polígono de la cuenca Huahua, elaborado por el INEGI, el cual fue refinado manualmente con las curvas de nivel, tomadas del mismo instituto, dando como resultado el polígono de la cuenca Huahua.

a) Cartografía

Se recopiló información cartográfica del área de estudio, abarcando cuatro cartas 1:50 000 con claves: E13B76, E13B77, E13B86 y E13B87; de las cuales se obtuvo información vectorial digital de hidrografía, carreteras y curvas de nivel. Se obtuvo un Modelo Digital de Elevación (MDE) con las curvas de nivel, por medio de una interpolación en el software ArcMap, con tamaño de pixel de 20 metros.

Como herramienta para la fotointerpretación se descargaron de la página oficial de INEGI las ortofotos digitales escala 1: 20 000 con claves: E13B76-c, E13B76-f, E13B77-a, E13B77-b, E13B77-d, E13B86-c y E13B87-a, con resolución de 2 m. Estas ortofotos fueron derivadas de la rectificación de fotografías aéreas escala 1:75,000 de abril de 1999 (vuelo realizado por el INEGI), con auxilio de puntos de control geodésico y un Modelo Digital de Elevación.

Otra cartografía consultada fue la carta Geológica-Minera Lázaro Cárdenas E13-6-9 escala 1:250 000 que sirvió como guía para el mapa geológico, además de la carta edafológica y uso de suelo y vegetación, con clave E13-6-9 de la misma escala.

b) Fotointerpretación

En esta etapa se realizó la fotointerpretación de las ortofotos mencionadas anteriormente, con el fin de generar la información de geología y parte del inventario de PRM. Para esta actividad primeramente se imprimieron secciones (tamaño carta) de las ortofotos, las cuales tenían un traslape del 60%. Posteriormente a cada impresión se le colocó un acetato en el cual se marcaría la fotointerpretación. Para esto se empleó un estereoscopio Stereo AIDS de

espejos, tomado del Laboratorio de Geociencias de la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES) unidad Morelia.

Se hizo un modelo de sombras a partir del MDE en el software ArcMap 10.5, con la finalidad de que ayudara al momento de la transferencia de la información fotointerpretada a formato digital.

La transferencia de la información se realizó mediante la técnica de digitalización visual, la cual consiste en la comparación de detalles morfológicos fotointerpretados, con aquellos que se reconocen en la cartografía topográfica (Hernández, 2005), en este caso se utilizaron las curvas de nivel y el modelo de sombras. Además, los acetatos fueron escaneados para posteriormente ser georeferenciados en ArcMap, con el fin de que dicha transferencia fuera más ágil. A continuación, se describe de manera más específica los procedimientos para cada producto de este estudio.

Por otro lado, se inició la consulta bibliográfica de la zona: libros, artículos científicos, monografías y tesis; enfocados a la descripción de generalidades de la zona de estudio, metodologías existentes para los modelos de susceptibilidad por movimientos en masa, formatos para descripción petrográfica, así como también antecedentes de trabajos realizados en zonas de México. Esta actividad duro hasta la conclusión de la tesis.

3.2. Elaboración de mapa geológico

3.2.1. Trabajo de gabinete

Para la elaboración del mapa geológico se consideraron las diferencias de tono y textura de las ortofotos, así como también la exageración de la tercera dimensión dada por el estereoscopio, con lo cual se lograron trazar litologías y lineamientos principales.

El mapa sombreado fue muy útil en el proceso de digitalización de la información, sobre todo en los lineamientos, ya que en éste se logró ver de manera muy marcada cada uno de ellos.

3.2.2. Trabajo de campo

Una vez hecha la fotointerpretación, se realizó una visita al área de estudio, con la finalidad de verificar los contactos litológicos. Por cuestiones de inseguridad, únicamente se pudo corroborar la parte sur de la cuenca (un trayecto de 12 km aproximadamente).

a) Recolección de muestras

La recolección de muestras, consistió en seleccionar bloques de roca con dimensiones entre 10 y 15 cm, compactos y con bajo grado de meteorización para garantizar el éxito en el corte de las secciones utilizando una cortadora de disco de diamante.

Se recolectaron 5 muestras a las cuales se hicieron estudios petrográficos para dar una clasificación más acertada del tipo de roca (Figura 3.1).

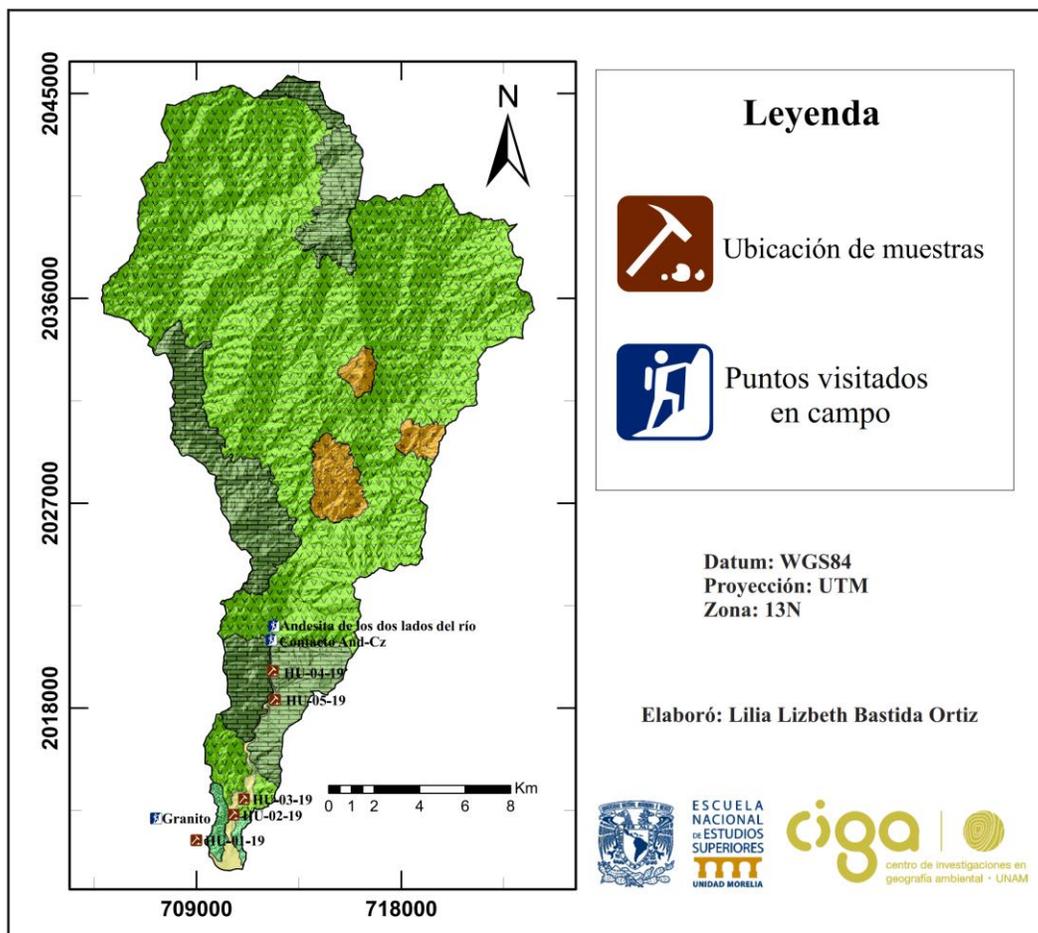


Figura 3.1. Mapa de localización de muestras. Se muestran, de símbolos color café, las muestras colectadas en campo; y de símbolos color azul, los afloramientos visitados en campo.

3.2.3. Trabajo de laboratorio

El trabajo de laboratorio consistió en realizar láminas delgadas a las muestras colectadas, de acuerdo con la metodología descrita por el SGM (2017) utilizando los equipos del Laboratorio de Petrografía del Instituto de Geofísica, Unidad Michoacán (IGUM).

Una vez elaboradas las 5 láminas delgadas de las respectivas muestras tomadas en campo, se procedió a hacer la descripción mineralógica de las láminas. Esto con ayuda de un microscopio petrográfico marca Carl Zeiss MicroImaging GmbH (Fig. 3.2), tomado de la Sala de Microscopios del IGUM.

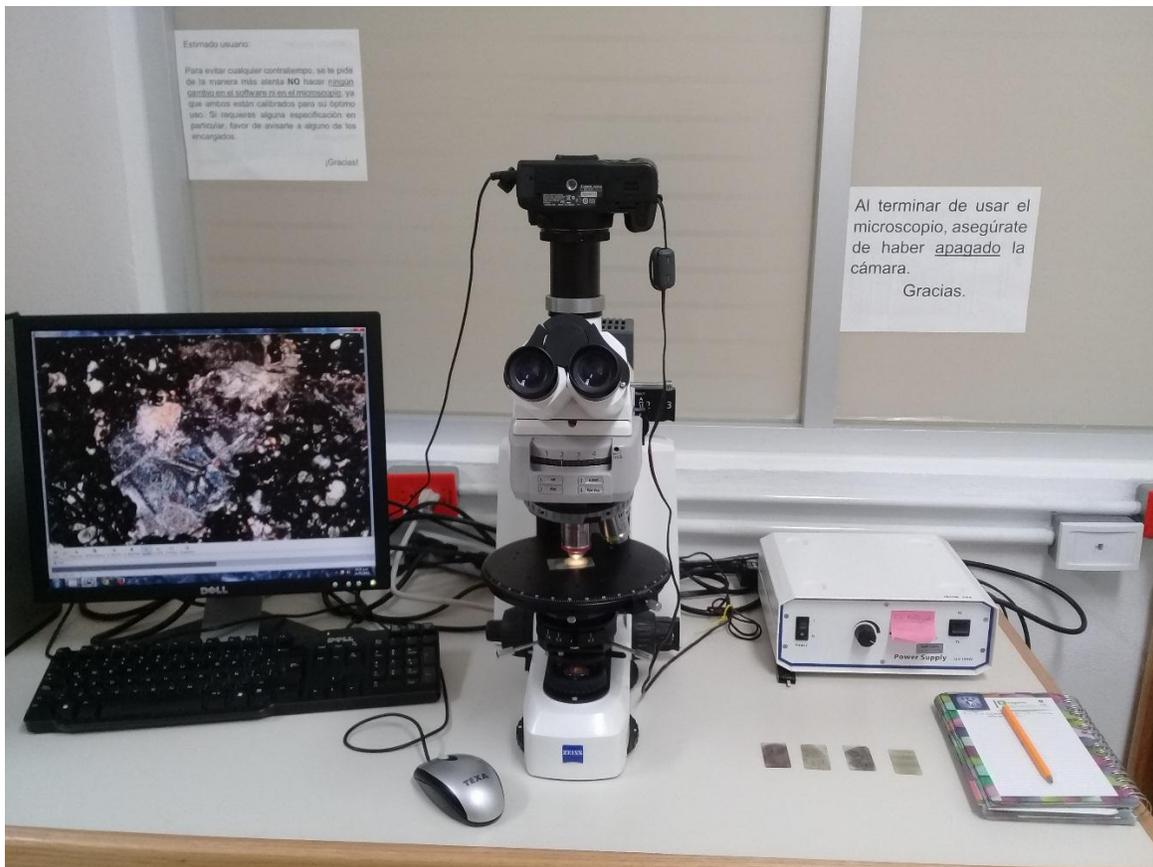


Figura 3.2. Microscopio petrográfico de la Sala de Microscopios del Instituto de Geofísica Unidad Michoacán (IGUM).

La propuesta de la cartografía geológica estuvo sujeta a correcciones con apoyo de los datos de campo y la petrografía, hasta llegar a una propuesta final.

3.3. Preparación de insumos y modelado

3.3.1. Inventario de PRM

El inventario de PRM fue elaborado con base en dos procedimientos. El primero fue a través de percepción remota, por medio de las ortofotos mencionadas anteriormente, con ayuda de Google Earth Pro el SIG ArcMap 10.5, además de la visualización 3D de la plataforma de Google Earth Pro. El segundo fue a través de la observación directa en campo, recolectando información con ayuda de la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Formato para descripción de inventario de PRM en campo (modificado de Alcántara y Murillo, 2007 y del Proyecto Multinacional Andino (PMA): Geociencias para las Comunidades Andinas (GCA), 2007). Continuación Tabla 3.1.

Número de evento	Fecha de observación dd/mm/aaaa	Localidad/ Toponimia	Coordenadas	Altitud	Tipo de movimiento	Tipo de material (roca, suelo, ambos)	Datos estructurales (estratificación, fallas, fracturas, etc.)	Unidad geomorfológica donde se encuentra	Uso de suelo y vegetación
------------------	---------------------------------	----------------------	-------------	---------	--------------------	---------------------------------------	--	--	---------------------------

Continuación Tabla 3.1.

No.	Estado de actividad/Desarrollo	Procesos erosivos asociados	Impacto manifiesto (daños ya ocurridos: construcciones, caminos, cultivos, cuerpos de agua, etc.)	Elementos expuestos a futuro (construcciones, caminos, cultivos, cuerpos de agua, etc.)	Observaciones adicionales	Dibujo del PRM / Fotografía
	() <i>Desarrollo inicial</i>	() <i>Erosión laminar</i>				
	() <i>En progresión</i>	() <i>Erosión concentrada (surcos y cárcavas)</i>				
	() <i>Avanzado</i>	() <i>Socavación lateral cauce</i>				
	() <i>Estabilizado</i>	() <i>Profundización de cauce</i>				
		() <i>Intemperismo (grado)</i>				

El inventario final consiste en puntos (variable de agrupamiento), ubicados en la zona de escarpe del movimiento en masa, esto debido a que la escala de trabajo y los insumos de información nos dieron problema para la generación de polígonos.

A pesar de las limitaciones que tiene un inventario de puntos, la metodología es válida, como lo muestran el trabajo de Salinas-Jasso *et al.* (2017) y Galindo y Alcántara (2015).

Siguiendo las recomendaciones de van Westen *et al.* (2008), el total de movimientos en masa fue agrupado de acuerdo al mecanismo de movimiento; pues “...se debe tener presente que el tipo e importancia de cada factor considerado para explicar la posible ocurrencia de un movimiento en masa depende del marco geoambiental en el que se desarrolle la zonificación y puede diferir sustancialmente de un área a otra debido a diferentes condiciones del terreno” (Corominas *et al.*, 2013, p. 215)

Debido a la poca ocurrencia de caídas y avalanchas, en comparación con los otros tipos de PRM, se decidió descartarlos y únicamente hacer el análisis de deslizamientos y flujos. Aunque, debido a que varios autores consideran las avalanchas como flujos de una magnitud mayor, las avalanchas fueron incluidas al inventario de flujos.

3.3.2. Preparación de factores condicionantes

De acuerdo con Guzzetti *et al.* (2006), la susceptibilidad es la probabilidad espacial de ocurrencia dado una combinación de variables condicionantes sin considerar el factor detonante dentro del análisis.

Tomando en cuenta los trabajos de varios autores (Regmi *et al.*, 2010; Barbieri y Camburi, 2009; Galindo y Alcántara, 2015), para este trabajo se consideraron diez variables condicionantes, las cuales se consideran importantes en la ocurrencia de los movimientos en masa en el área de estudio.

3.3.2.1. Geología.

Las unidades geológicas de superficie son uno de los factores condicionantes más importantes en la inestabilidad de las laderas, por lo que es necesario obtener y mapear datos relacionados con sus características (SGC, 2017).

Cada unidad geológica se considera como el resultado de una serie de procesos tanto exógenos como endógenos que modelan la superficie terrestre y le confieren al terreno una serie de propiedades que la hacen más o menos susceptible a la ocurrencia de movimientos en masa, de ahí la importancia de tomar en cuenta esta variable en el análisis (SGC, 2017).

La elaboración de este mapa se describe en la etapa dos de la metodología. Debido a que este insumo se generó en formato vectorial se transformó a formato ráster.

3.3.2.2. Suelos.

La información del tipo de suelo es relevante en el análisis de susceptibilidad, debido a que, cada grupo de suelos tiene materiales con comportamientos físicos (plasticidad, resistencia, etc.) diferentes. Además, en algunos materiales específicos se desarrollan de manera más fácil algunos tipos de movimientos en masa. Por ejemplo, los deslizamientos por flujo ocurren en cierto tipo de materiales como arenas o limos saturados no compactados o arcillas “extra-sensitivas” (PMA:GCA, 2007).

Para el mapa de suelos se georreferenció la carta edafológica E13-6 (INEGI, 2013) y se digitalizaron las unidades del área de interés. Se asignaron los datos de grupo edafológico y textura a cada unidad, por último, esta información se convirtió a formato ráster.

3.3.2.3. Uso de suelo y vegetación.

Uno de los factores más importantes para la ocurrencia de PRM es el cambio en la cobertura del suelo, ya sea debido a actividades antropogénicas (por ejemplo, tala de bosques para terrenos agrícolas, construcción de caminos, construcción de viviendas) o debido a las actividades naturales (por ejemplo, incendios forestales) (van Westen, 2013). Es por esto que se debe incluir esta variable en el análisis de susceptibilidad.

Esta información, se recopiló del conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación escala 1:250,000, editada por el INEGI en el año 2013. Al igual que los insumos anteriores, se convirtió a formato ráster.

3.3.2.4. Pendientes.

La pendiente se define como el ángulo existente entre la superficie del terreno y la horizontal, cuyo valor se expresa en grados de 0 a 90 (SGC, 2017). El ángulo de pendiente tiene una relación con la generación de movimientos en masa debido a que constituyen un fenómeno de tipo gravitacional en donde, generalmente, las pendientes con valores altos están asociados a valores de aceleración mayores (Cortés y Grajales, 2018). Además, influye en la distribución de agua en la ladera (Santacana, 2001).

Esta variable se construyó a partir del MDE. Posterior a la generación de los valores de pendientes, se asignaron seis rangos divididos cada 10° (Tabla 3.2), considerando la propuesta de Regmi *et al.*, 2010. Obteniendo así el mapa de pendientes en formato ráster.

Tabla 3.2. Clasificación de categorías de pendiente (adaptado de Regmi *et al.*, 2010).

Pendientes
<10°
10° – 20°
20° – 30°
30° – 40°
40° – 50°
>50°

3.3.2.5. Relieve relativo.

El relieve relativo se define como la diferencia entre la mayor y la menor elevación por unidad de área y se expresa como la máxima diferencia de altura del terreno por km² (SGC, 2013). Es importante en la ocurrencia de movimientos en masa, pues el relieve relativo está directamente relacionado con la resistencia de los materiales a nivel superficial; si el material se encuentra muy disectado se genera un relieve con notables intervalos de altura (Cortés y Grajales, 2018).

Nuevamente mediante el MDE se obtuvo esta variable. En un área de 15x15 se hizo el cálculo de la diferencia de altura, con ayuda de ArcMap. Los valores se agruparon en cinco rangos, tomando en cuenta la propuesta del SGC (2013) y haciendo una adaptación para el área de estudio (Tabla 3.3).

Tabla 3.3. Clasificación de categorías de relieve relativo (adaptado de SGC, 2013).

Relieve relativo
<50 m
50 m – 100 m
100 m – 200 m
200 m – 300 m
>300 m

3.3.2.6. Orientación de la ladera.

Esta variable hace referencia a la orientación de cada celda del terreno respecto al norte geográfico, así se tienen valores de 0° a 360° (Londoño-Linares, 2017). En general, se sugiere que la orientación de la ladera influye en la exposición a la luz solar y a los vientos, afectando indirectamente otros factores que contribuyen a los movimientos en masa, como la precipitación, la humedad del suelo, la cubierta vegetal y el espesor del suelo (Clerici *et al.* 2006).

La obtención de esta información fue a partir del MDE con ayuda del software ArcGIS 10.5. Los valores fueron reclasificados en nueve categorías (plano, norte, noreste, este, sureste, sur, suroeste, oeste y noroeste), esto de acuerdo con la propuesta de Regmi *et al.*, 2010 (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Clasificación de categorías de relieve relativo (adaptado de SGC, 2013).

Grados	Orientación
-1°	Plano
337°-360°, 0°-22°	Norte
22°-67°	Noreste
67°-112°	Este
112°-157°	Sureste
157°-202°	Sur
202°-247°	Suroeste
247°-292°	Oeste
292°-337°	Noroeste

3.3.2.7. Curvatura.

El mapa de curvatura de la ladera fue creado a partir del MDE, el proceso consiste en identificar los valores altimétricos de los píxeles en relación con sus vecinos, así, si el valor es negativo existe una pendiente cóncava, si es positivo la pendiente es convexa y si se mantiene constante es plana. Finalmente se reclasificaron los píxeles con las tres clases anteriores para que cada clase tenga un mismo valor, obteniendo así un mapa ráster (Galindo y Alcántara, 2015).

La variable se relaciona con los movimientos en masa en la medida en que indica el grado de concentración o dispersión del drenaje superficial. En las zonas cóncavas el flujo se concentra hacia la celda mientras que se dispersa en las convexas. Una curvatura cóncava es más efectiva en la captación de agua de lluvia que es un condicionante morfológico característico en la potencial generación de movimientos en masa superficiales (Carrara, 1983).

3.3.2.8. Distancia a drenaje.

Esta distancia consiste en una distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta el río más cercano. Los ríos generalmente juegan un papel importante en la modificación del paisaje incidiendo en las diferentes rocas (Meten *et al.* 2015), por tal razón es importante considerarlos en este tipo de estudios.

Con ayuda del software ArcGIS se realizó un mapa de distancias con la información de los ríos. Posteriormente se hizo una categorización de cinco rangos, adaptando la propuesta de Regmi *et al.*, 2010 (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Clasificación de categorías de distancia a drenaje (adaptado de Regmi *et al.*, 2010).

Distancia a drenaje
<25 m
25 m – 50 m
50 m – 100 m
100 m – 250 m
>250 m

3.3.2.9. Distancia a vías de comunicación terrestre.

De acuerdo con Dahal *et al.* (2008), uno de los factores que controlan la estabilidad de la pendiente es la construcción de carreteras. Las vías están asociadas a las intervenciones antrópicas que pueden llegar a desarrollar procesos de inestabilidad, esto se produce debido a los cortes generados, ya que estos pueden ocasionar una mayor inestabilidad en el terreno (Cortés y Grajales, 2018).

La información fue generada de la misma manera que el mapa de distancia a lineamientos, sólo que ahora a partir de la información de vías y adaptando la propuesta de Regmi *et al.*, 2010 (Tabla 3.6).

Tabla 3.6. Clasificación de categorías de distancia a vías (adaptado de Regmi *et al.*, 2010).

Distancia a vías
<20 m
20 m – 40 m
40 m – 100 m
100 m – 350 m
>350 m

3.3.2.10. Distancia entre lineamientos.

Esta variable se refiere a la distancia euclidiana desde cada punto del terreno hasta un lineamiento (falla geológica posible) más cercano (Londoño-Linares, 2017). La intensidad de ruptura de la superficie del terreno, además de otros factores, está influenciada por la distancia a lineamientos o fallas. A medida que la distancia a los lineamientos se reduce, la fractura de las masas rocosas y el grado de meteorización aumentan, lo que aumenta las posibilidades de que se produzcan movimientos en masa (Clerici *et al.* 2006).

La información de lineamientos fue interpretada con ayuda de un modelo sombreado, generado a partir del MDE.

Posteriormente, mediante el software ArcGIS se realizó un mapa de distancias con la información de los lineamientos. Posteriormente se hizo una categorización de cinco rangos, de acuerdo con la propuesta de Regmi *et al.*, 2010 (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Clasificación de categorías de distancia a lineamientos (modificado de Regmi et al., 2010).

Distancia a lineamientos
<25 m
25 m – 75 m
75 m – 150 m
150 m – 350 m
>350 m

3.3.3. Métodos estadísticos bivariados

Los métodos estadísticos bivariados han sido desarrollados con el objetivo de lograr un mayor grado de objetividad en la asignación de pesos, como lo muestra en su trabajo Barbieri y Camburi (2009), además de una mejor reproducibilidad de la zonificación del peligro por movimientos en masa. El análisis se basa en la superposición de mapas de parámetros y el cálculo de densidades de movimientos en masa en cada clase de las variables condicionantes consideradas (van Westen, 1994).

La escala media es la más apropiada para este tipo de análisis. Los métodos no son lo suficientemente detallados para aplicarse a escalas locales, y en la escala regional es difícil obtener el inventario de movimientos en masa necesario (van Westen, 1994). La escala media, según Ojeda (1996), corresponde a cuencas hidrográficas, provincias, regiones y subcuencas, las cuales corresponden a áreas que van desde los 300 km² hasta 1,500 km² (Ojeda, 1996). En este caso, el área de estudio, de acuerdo al área (~305 km²), corresponde a una escala media, por lo que este tipo de análisis es ideal para la zona.

El uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es muy adecuado para estos métodos, pues implican una gran cantidad de superposiciones de mapas y la manipulación de datos de atributos (van Westen, 1994). Por esta razón, en este trabajo los métodos se desarrollaron en ArcMap.

Existen varios métodos estadísticos bivariados específicos que se basan en los mismos principios, pero utilizan índices diferentes. En este trabajo se aplican dos métodos, los cuales se describen a continuación.

Es importante mencionar que antes de empezar a hacer el análisis de susceptibilidad, se eligió de manera aleatoria el 20% de deslizamientos y el 20% de flujos, esto como muestra de validación; y el 80% restante se usó como muestra de entrenamiento (muestra con la que se realizaron los análisis). Esto con el fin de ver la capacidad de predicción del modelo. Además, este paso se realizó dos veces, con la finalidad de ver que tanto varían los resultados al elegir la muestra aleatoriamente.

3.3.3.1. Método Pesos de Evidencia (WofE)

De acuerdo con van Westen (2002) en el modelado estadístico de deslizamientos se utiliza la regla "el presente y el pasado son la clave del futuro". Esto significa que se pueden observar las condiciones bajo las cuales ocurrieron deslizamientos en el pasado, y usar las combinaciones críticas para predecir la posible ocurrencia de deslizamientos donde prevalecen las mismas condiciones, pero que todavía están libres de deslizamientos (van Westen, 2002).

“El método de pesos de evidencia se basa en el teorema de Bayes y en los conceptos de probabilidad previa y posterior (Bonham-Carter, 1994). Para aplicar este método se necesitan datos de entrada, los cuales consisten en un mapa que contiene información sobre las características que se quieren predecir (en este caso, el mapa de inventario de movimientos en masa), que se denomina mapa de evidencia. Por otro lado, también se necesita el conjunto de datos que contiene una serie de mapas de factores que pueden controlar la aparición de la función que se quiere predecir, en este caso, son los diez mapas descritos en la etapa 3.3.2. Por lo tanto, es posible calcular el grado de influencia que cada factor tuvo, y tendrá en el futuro, en el desarrollo de movimientos en masa” (Barbieri y Cambuli, 2009, p. 2659).

a) Cálculo de la probabilidad previa

Se habla de probabilidad previa cuando no hay información adicional al inventario de PRM, es decir, no se sabe si el deslizamiento ocurre en una unidad geológica, o en una pendiente pronunciada (van Westen, 2002).

La probabilidad previa de que en un determinado píxel del mapa ocurra un PRM es simplemente la densidad de movimientos en masa en toda el área. En otras palabras, el

número de píxeles con PRM, dividido por el número total de píxeles en el mapa (ec. 1) (van Westen, 2002).

$$P_{previa} = P\{S\} = \frac{N_{pix}(PRM)}{N_{pix}(Total)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

$P_{previa} = P\{S\}$	Probabilidad de que ocurra un PRM S
$N_{pix}(\text{Deslizamientos})$	Número de píxeles con PRM en el mapa
$N_{pix}(\text{Total})$	Número total de píxeles en el mapa

b) Cálculo de la probabilidad posterior

La probabilidad posterior, también llamada probabilidad condicional, se aplica cuando hay más información disponible que el inventario de PRM. Con esta, podemos ver cuál será la probabilidad de que ocurra un PRM, dado que existe una unidad geomorfológica determinada (van Westen, 2002).

Teniendo en cuenta la relación entre un mapa de variable binaria (B) y el mapa de inventario de PRM (S), la probabilidad dada una cierta condición se puede expresar como:

$$P\{S/B\} = \frac{P\{B \cap S\}}{P\{B\}} = \frac{N_{pix}(B \cap S)}{N_{pix}(B)} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$P\{S/B\}$	Probabilidad condicional de que ocurra un PRM mientras está en la unidad B
$N_{pix}(S \cap B)$	Número de píxeles con PRM en la unidad B
$N_{pix}(B)$	Número total de píxeles en la unidad B

En otras palabras, la probabilidad condicional de que ocurra un deslizamiento, dado que está en una determinada unidad, es la densidad de deslizamientos dentro de esa unidad (van Westen, 2002). Así, la probabilidad posterior se calcula sumando los pesos de cada factor en una función aditiva (SGC, 2017).

Tomando en cuenta la información anterior, Bonham-Carter (1994), propone el cálculo de los pesos de cada variable con las ecuaciones siguientes:

$$W^+ = \ln \left(\frac{P(B_i/S)}{P(B_i/\bar{S})} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$W^- = \ln \left(\frac{P(\bar{B}_i/S)}{P(\bar{B}_i/\bar{S})} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

B_i	Presencia de un factor condicionante con $i=1 \dots n$ clases
\bar{B}_i	Ausencia de un factor condicionante con $i=1 \dots n$ clases
S	Presencia de movimiento en masa
\bar{S}	Ausencia de movimiento en masa

Debido a que este tipo de análisis se realiza mediante mapas en SIG, van Westen (2002), propone que los pesos de cada clase, en términos de pixeles, se pueden expresar de la siguiente forma:

$$W_i^+ = \ln \left(\frac{\frac{Npix1}{Npix1+Npix2}}{\frac{Npix3}{Npix3+Npix4}} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

$$W_i^- = \ln \left(\frac{\frac{Npix2}{Npix1+Npix2}}{\frac{Npix4}{Npix3+Npix4}} \right) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde, cada elemento puede interpretarse de la siguiente forma (Figura 3.3):

Npix1	Hay presencia del factor condicionante en el movimiento en masa
Npix2	No hay presencia del factor condicionante en el movimiento en masa
Npix3	Factor condicionante
Npix4	No hay movimiento en masa ni factor condicionante

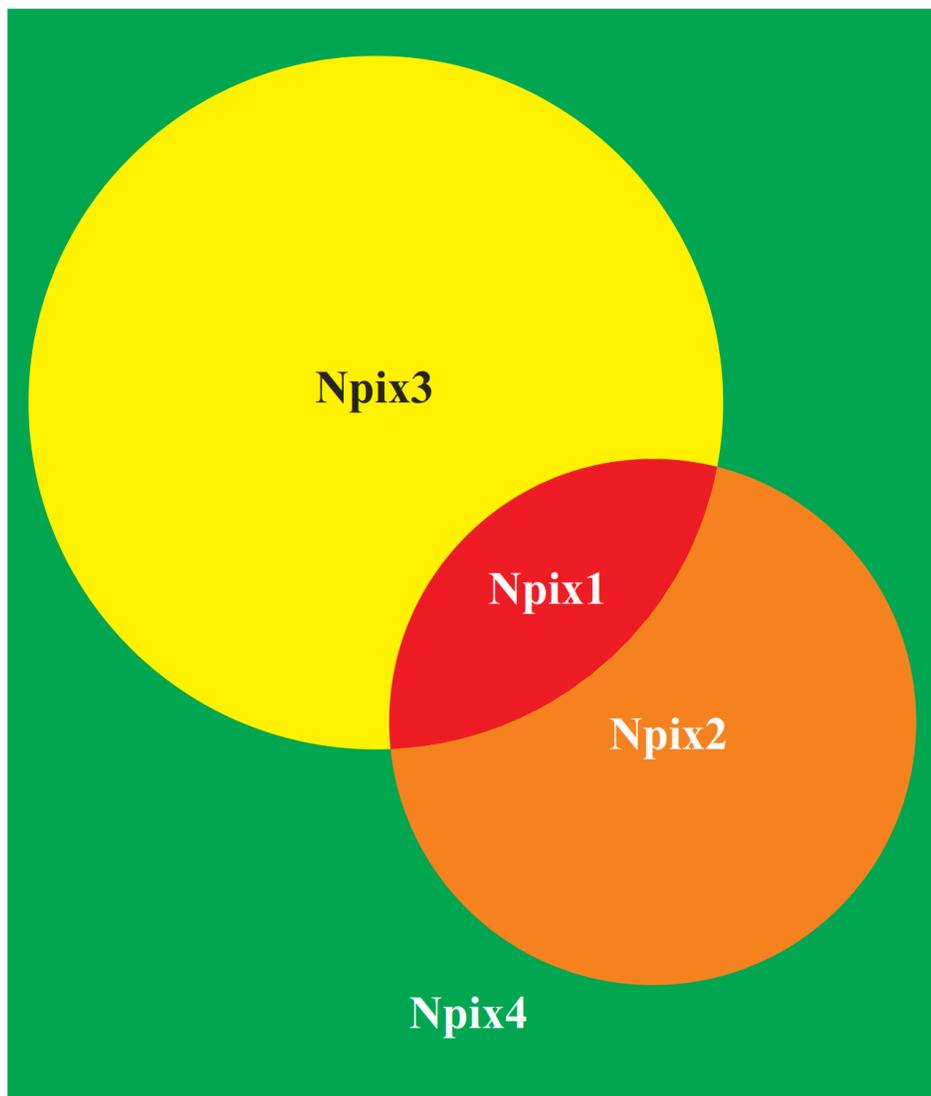


Figura 3.3. Se observa de manera gráfica la relación del movimiento en masa y el factor condicionante (modificado de SGC, 2017).

La interpretación de los pesos se describe en la tabla 3.8.

Tabla 3.8. Interpretación de los pesos para cada una de las clases de los mapas de factores (SGC,2017).

W_i^+	W_i^-
Indica la importancia de la presencia del factor en el PRM de la siguiente forma:	Indica la importancia de la ausencia del factor en el PRM de la siguiente forma:
$W_i^+ > 0$: positivo, indica que la presencia del factor contribuye a la presencia del PRM, su magnitud indica el grado de correlación directa o el grado de contribución.	$W_i^- > 0$: positivo, indica que la ausencia del factor contribuye a la presencia del PRM.
$W_i^+ < 0$: negativo, indica que la presencia del factor contribuye a la ausencia PRM, su magnitud indica el grado de correlación inversa.	$W_i^- < 0$: negativo, indica que la ausencia del factor contribuye a la ausencia del PRM.
$W_i^+ = 0$: indica que el factor no es relevante.	$W_i^- = 0$: indica que el factor no es relevante.

Para obtener los valores de las variables de la ecuación 5 y 6 se combinó el inventario de movimientos en masa de cada mecanismo (con su respectiva muestra aleatoria) con cada uno de los factores condicionantes considerados en este trabajo. El resultado de la combinación fue una tabla de atributos que muestra el número (o área) de movimientos en masa para cada clase del factor considerado. Con esto, los pesos de evidencia W_i^+ y W_i^- fueron calculados para cada clase de los mapas de factores descritos en el apartado 3.3.1. El cálculo de los pesos fue elaborado en una hoja de cálculo para facilitar el manejo y la aplicación del método.

Con la finalidad de ver la correlación entre el factor condicionante y los movimientos en masa se utiliza el factor de contraste (Cw), el cual Bonham-Carter (1994) define como la diferencia entre los pesos positivos y negativos (ec. 7):

$$Cw = W^+ - W^- \quad \text{Ecuación 7}$$

El factor de contraste C_w será cero cuando la distribución espacial de los movimientos en masa es independiente del factor considerado, es positivo cuando existe una asociación positiva (la presencia del factor contribuye a la ocurrencia del movimiento en masa) y negativo cuando existe una asociación negativa (la ausencia del factor contribuye a la ocurrencia del movimiento en masa) (SGC, 2017).

La suma del factor de contraste C_w , de cada factor, corresponde a la función final de susceptibilidad (ec. 8) o LSI (landslide susceptibility index, por sus siglas en inglés) (SGC, 2017).

$$LSI = C_w \text{Pendiente} + C_w \text{Curvatura} + C_w \text{Geología} + \dots + C_w \text{Uso del suelo} \quad \text{Ecuación 8}$$

Adicionalmente, para este estudio, se decidió calcular otro índice de susceptibilidad utilizando los pesos positivos (ec. 9), esto con la finalidad de ver los resultados obtenidos al considerar únicamente el valor de la importancia de la presencia de los factores en los deslizamientos y flujos.

$$LSI = W^+ \text{Pendiente} + W^+ \text{Curvatura} + W^+ \text{Geología} + \dots + W^+ \text{Uso de suelo} \quad \text{Ecuación 9}$$

Es importante recalcar que la aplicación de este método está sujeta a ciertas condiciones que deben tenerse en cuenta al momento de interpretar los resultados obtenidos (Tabla 3.9) (SGC, 2017).

Tabla 3.9. Ventajas y desventajas del método estadístico bivariado Pesos de Evidencia.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • El método es objetivo y evita la subjetividad de elegir los pesos de los factores, como en los métodos semicuantitativos. • La relación entre el factor condicionante y los movimientos en masa se evalúa con bases estadísticas. • Replicabilidad y control del proceso de zonificación final. • Control de la capacidad de predicción del modelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • El método asume que los movimientos en masa ocurren debido a la misma combinación de factores en toda el área de estudio. • El método requiere de criterio experto en la selección de los factores condicionantes relacionados con las hipótesis de falla planteadas. • El método es sensible a exigencias como errores de mapeo, completitud del inventario, resolución de los datos y unidad de terreno considerada. • Si el método es utilizado con una pequeña muestra de ocurrencias de procesos conocidos, los resultados deben ser interpretados con cuidado (García, 2008). • El método asume que los factores son condicionalmente independientes unos de otros y por lo tanto se deberían comprobar. • Los mapas obtenidos no se pueden verificar mediante una solución analítica.

SGC, 2017.

3.3.3.2. Radio de frecuencia (Frequency Ratio, FR)

Los enfoques de frecuencia se basan en las relaciones observadas entre la distribución de movimientos en masa y los factores relacionados con su ocurrencia., para determinar la correlación entre la localización de los PRM y los factores en el área de estudio (Lee y Pradhan, 2007).

FR es un análisis de relaciones, la relación es la del área donde ocurrieron movimientos en masa con el área total (ecuación 10) ((Lee y Pradhan, 2007). La relación de frecuencia es la relación entre la probabilidad de una ocurrencia y la probabilidad de una no ocurrencia para atributos dados (Bonham-Carter 1994). En el caso de un movimiento en masa, si este

evento se representa por un factor, "B", y los atributos de este factor se denotan por " D ", entonces la relación de frecuencia de D es la proporción de la probabilidad condicional (Lee y Sambath, 2006). Esta relación se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$FR = \left(\frac{\frac{\text{Área de mm en la clase}}{\text{Área de todos los mm}}}{\frac{\text{Área de la clase}}{\text{Área de todo el mapa}}} \right) \quad \text{Ecuación 10 (van Westen, 2013)}$$

Al observar la ecuación 6, nos damos cuenta que los valores serán mayores que 0; entonces, si el valor es menor que 1, la relación entre un movimiento en masa y la clase del factor es débil, en cambio si el valor es mayor que 1, significa que la relación entre un movimiento en masa y la clase del factor es fuerte. Y si el valor es 1 es un valor promedio (Lee y Sambath, 2006).

El índice de susceptibilidad de deslizamiento (LSI) se calculó mediante la suma del valor de la relación de cada factor utilizando la siguiente ecuación:

$$LSI = FR \text{ Pendiente} + FR \text{ Curvatura} + FR \text{ Geología} + \dots + FR \text{ Uso de suelo} \quad \text{Ecuación 11}$$

3.3.4. Curva de éxito

Para construir cualitativamente el mapa de susceptibilidad de movimientos en masa, no basta con calcular el LSI, pues se deben asignar las categorías de susceptibilidad de acuerdo con los resultados del LSI. Para esto, es necesario construir una curva de éxito.

La curva de éxito mide la bondad de ajuste de la función de susceptibilidad a los movimientos en masa inventariados (Dahal *et al.*, 2008).

Para obtener esta curva, se tomó en cuenta la metodología propuesta por Danhal *et al.* (2008). Primero se ordenaron los valores del LSI de forma descendente. Posteriormente, se hizo una reclasificación en 50 clases con intervalos iguales (herramienta Equal Interval de ArcGIS 10.5) para conocer el número de píxeles en cada categoría. Este mapa de categorías se cruzó con la variable de agrupamiento (deslizamientos y flujos) para determinar con cuántos píxeles de la variable tiene relación.

Para la elaboración de la curva de éxito se trazaron en el eje X los valores agrupados acumulados del LSI de menor a mayor, de forma que a la izquierda se ubique el rango 1 (susceptible) y a la derecha el rango 50 (no susceptible). Y en el eje Y se ubicaron los valores porcentuales acumulados de los movimientos en masa correspondientes al rango de LSI. La curva se construyó en términos del área total de la zona de estudio y el área total de movimientos en masa (Dahal *et al.*, 2008). Recordar que, en este procedimiento se usó la muestra de entrenamiento de cada mecanismo, correspondiente al 80% de la muestra total.

Seguido de lo anterior, para la muestra uno de deslizamientos (para los tres métodos) se hizo un ajuste polinomial de tercer orden a las curvas para encontrar una tendencia general del comportamiento de los datos. Para la muestra dos se hizo un ajuste de grado tres para los modelos de W+ y FR, mientras que para el modelo FR se realizó un ajuste polinomial de grado cuatro. Después se evaluó el área bajo la curva (ABC), para establecer la calidad de ajuste de los datos. Cuanto más pronunciada sea la parte inicial de la curva y mayor el ABC, mejor será la capacidad de la función para describir la distribución de los movimientos en masa. Un porcentaje aceptable de ajuste debe ser mayor a 70% (SGC, 2017).

Para el mecanismo por flujos, se hizo un ajuste polinomial de quinto orden en las dos muestras, para los tres métodos.

En el anexo 2 se presentan los datos detallados de los ajustes a los datos para cada modelo.

3.3.5. Categorías de susceptibilidad

Las categorías de los mapas de susceptibilidad por movimientos en masa (deslizamientos y flujos) fueron establecidas con las curvas de éxito, haciendo una adecuación de la propuesta de van Westen (2013):

- Susceptibilidad alta: porcentaje de todos los movimientos en masa >75%.
- Susceptibilidad media: porcentaje de todos los PRM hasta máximo 15%.
- Susceptibilidad baja: porcentaje de todos los movimientos en masa <10%.

En la tabla 3.10 se muestra una descripción de los criterios para clasificar las distintas zonas de susceptibilidad.

Tabla 3.10. Clasificación de las clases de susceptibilidad propuestas por van Westen (2013).

Categoría de susceptibilidad	Características
Alta	<ul style="list-style-type: none"> • Tiene la mayor área acumulada de PRM. • Tiene el mayor número de movimientos en masa. • Tiene la mayor densidad de PRM en porcentaje. • Tiene la mayor densidad de movimientos por unidad de área. • Las áreas de esta categoría deben ser lo más pequeñas posibles y limitarse a aquellas zonas donde se han producido procesos y es más probable que se produzcan en el futuro.
Media	<ul style="list-style-type: none"> • Son áreas que presentan baja densidad de movimientos en masa, aunque eventualmente se pueden presentar.
Baja	<ul style="list-style-type: none"> • Son áreas donde se espera una muy baja densidad de ocurrencia de PRM.

3.3.6. Validación de modelos

La validación de los resultados de los modelos estadísticos se realizó con el 20% de la muestra del total de deslizamientos y con el 20% de la muestra total de flujos. Para esto se hizo un cruce del mapa de zonificación de movimientos en masa tipo deslizamientos y la muestra del 20%, obteniendo una tabla de frecuencias donde se observa la capacidad de predicción del modelo, es decir, el número de deslizamientos que están presentes en cada categoría de susceptibilidad. Este mismo procedimiento se hizo para el mapa de zonificación de movimientos tipo flujo. Una buena predicción agruparía el mayor número de movimientos en masa en las categorías alta y media de susceptibilidad.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1. Mapa geológico

Las unidades de roca (Fig. 3.1) recolectadas en el área de estudio se describen a continuación.

4.1.1. Muestra HU-01-19

Esta muestra fue recolectada 400 m al suroeste del área de estudio, a un costado de la carretera federal número 200 (Lázaro Cárdenas - Tecomán), en la entrada al poblado El Zapote de las Viejas. Consiste en una arenisca color café oscuro, en el afloramiento se observa: estratificación de pocos centímetros, intemperismo de grado medio y alto fracturamiento (Figura 4.1).



Figura 4.1. Arenisca tipo grauwaca. Se muestra el afloramiento de donde fue recolectada la muestra HU-01-19.

Petrográficamente, la roca se constituye por un 80% de matriz, 15% de plagioclasa y un 5% de fragmentos líticos. Como minerales secundarios, se encuentran anfíboles (Anf) (Figura 4.2, A y B) y sericita producto de la alteración de Plagioclasa (Fig. 4.2). El estado de madurez, de acuerdo a las características del sedimento (Tabla 4.1.), es inmadura.

Tabla 4.1. Características del sedimento de la muestra HU-01-19.

Forma	Esfericidad	Redondez	Tamaño de partículas	Fabrica (Matriz)	Orientación de partículas	Clasificación	Madurez
Cilíndrico	Baja	Anguloso	Arenas finas	Flotante	No se observa	Mal clasificado	Inmaduro

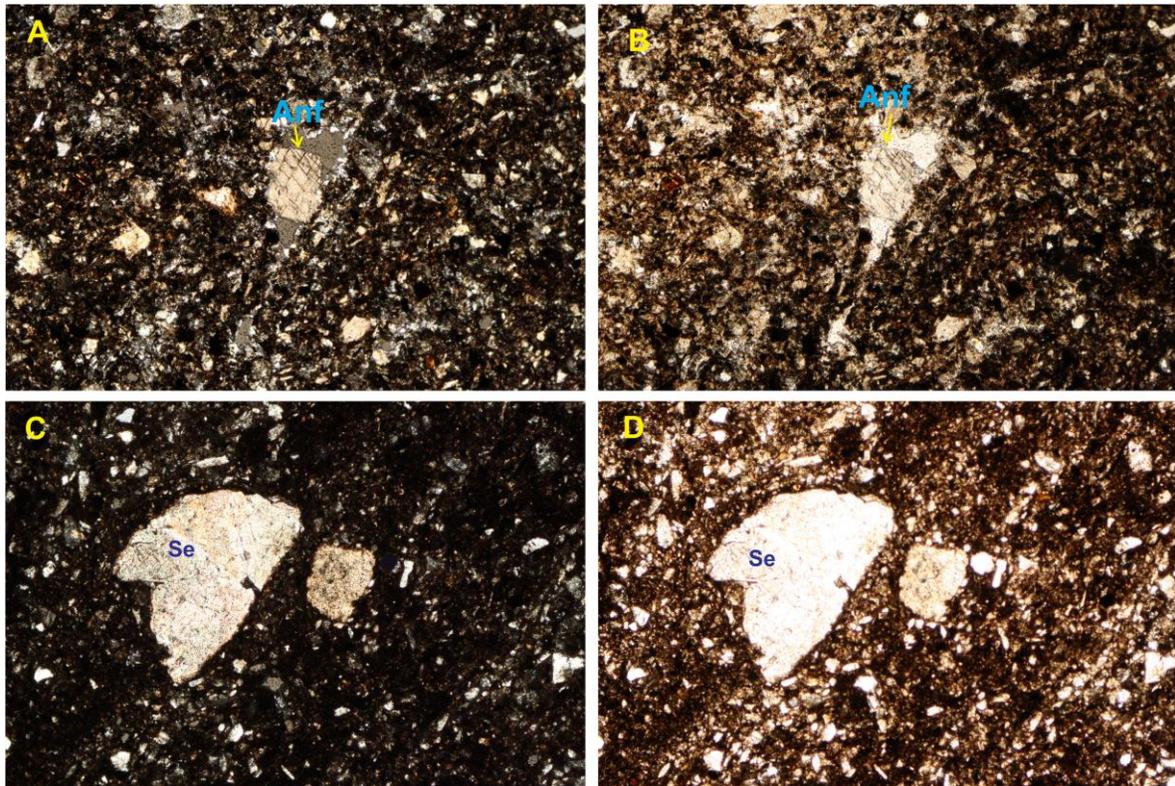


Figura 4.2. Anfíbol en una matriz angulosa, mal clasificada (luz polarizada A y natural B). Fotografía con nícoles cruzados (C) y paralelos (D) de una acumulación de cristales de sericita (Se), embebido en una matriz de plagioclasa y vidrio, mal clasificada. Fotografías tomadas con objetivo 5X.

Por las características petrográficas y las relaciones de campo, de acuerdo con la clasificación de Folk (1974), la roca es una arenisca tipo *grauwaca* feldespática.

4.1.2. Muestra HU-02-19

A nivel de afloramiento en la muestra HU-02-19 se observan bloques de decenas de centímetros, angulosos, consolidados y soportados por una matriz limosa medianamente consolidada. Los minerales en los bloques consisten en fenocristales que van de 1 mm a 5 mm, de color verde pálido con fragmentos de color café y gris; presenta colores de oxidación indicando intemperismo (Figura 4.3). La textura de la mayoría de los fragmentos de roca es porfídica.



Figura 4.3. Brecha andesítica. Se muestra el afloramiento de donde fue tomada la muestra HU-02-19.

Petrográficamente, los líticos presentan una textura porfídica, con las siguientes proporciones de minerales: 50% Plg, 10% ortopiroxeno (Opx) y 5% anfíbol (Anf). Las plagioclasas están embebidas en una matriz de vidrio (35%) y muestran indicios de alteración a arcillas (caolín). Los piroxenos presentan bordes alterados. Hay presencia de óxidos de hierro (Fe) y titanio (Ti). También, la muestra contiene líticos de 0.3 a 0.8 mm, de composición andesítica (Figura 4.4).

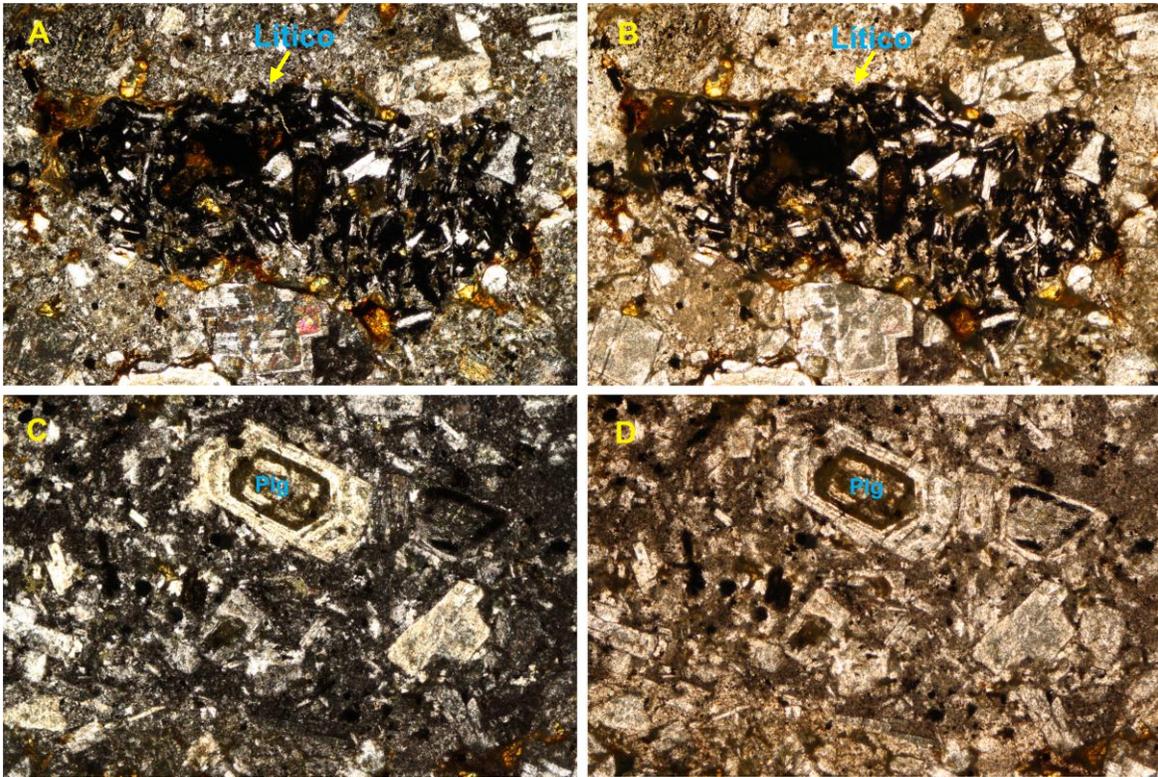


Figura 4.4. Fotografía con nícoles cruzados (A) y paralelos (B) de lítico embebido en una matriz de plagioclasa y vidrio. Plagioclasa zonada en un lítico máfico (C. Luz polarizada, D. Luz natural). Fotografías tomadas con objetivo 5X.

Por las características anteriores la muestra se clasificó como una Brecha andesítica de Px y Anf.

4.1.3. Muestra HU-03-19

La unidad de esta muestra, en campo, presenta un alto grado de intemperismo, se encuentra de forma masiva y con alto grado de fracturamiento (Fig. 4.5).



Figura 4.5. Se muestra el afloramiento de donde fue tomada la muestra HU-03-19.

Petrográficamente presenta una textura brechoide con fenocristales de plagioclasa (Fig. 4.6). El vidrio está presente en un 50% de la muestra, contiene cristales de piroxeno (5%) y líticos de textura afanítica de composición andesítica-basáltica. También se logran apreciar algunos cristales de anfíbol que están siendo reemplazados por un óxido (Fig. 4.6).

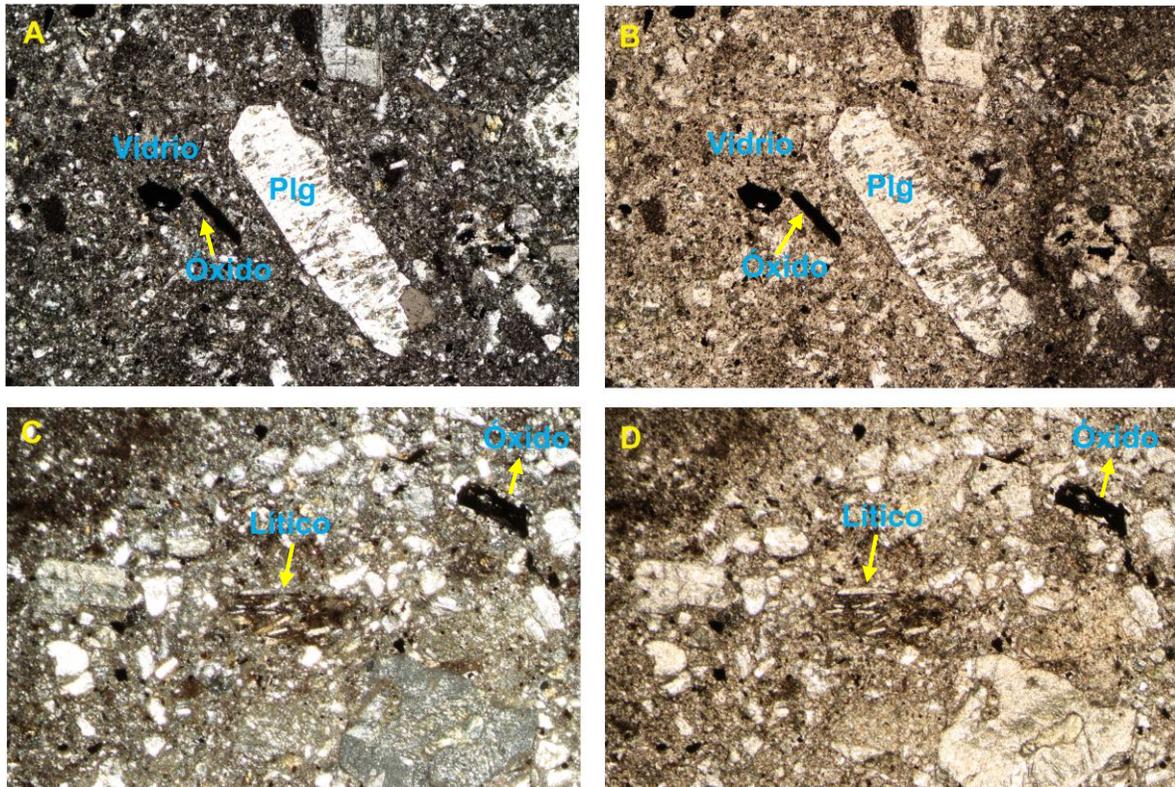


Figura 4.6. Brecha andesítica. Se observa una textura brechoide, resaltando un fenocristal de Plg, además se observa la presencia de óxido (A, luz polarizada; B, luz natural). Lítico de textura afanítica con microcristales de Plg y vidrio (C, luz polarizada; D, luz natural). Fotografías tomadas con objetivo 5X.

Por las características de campo y la petrografía la roca fue clasificada como una Brecha andesítica.

4.1.4. Muestra HU-04-19

En afloramiento la roca está interestratificada con unidades de andesita. Se observa un alto grado de intemperismo y alto fracturamiento (Figura 4.7).

En muestra de mano, se observa bandeamiento de tonalidades verdes y blancas.



Figura 4.7. Hornfels. Se muestra el afloramiento de donde se recolectó la muestra HU-04-19. Se logra apreciar el bandeamiento de la unidad.

Al microscopio la muestra presenta una fábrica anisotrópica conformada por clivaje espaciado. Los dominios de clivaje son ricos en Cl (bandas oscuras), mientras que los microlitones son ricos en Se (bandas claras). La forma de los dominios de clivaje es lisa y su porcentaje es alrededor de 30% (Figura 4.8). Se identificó una paragénesis de alteración de Se+Cl.

La roca se clasificó como un hornfels formado por metamorfismo de contacto de muy bajo grado en facies de hornfels de albita-epidota a partir de una roca de clase química básica.

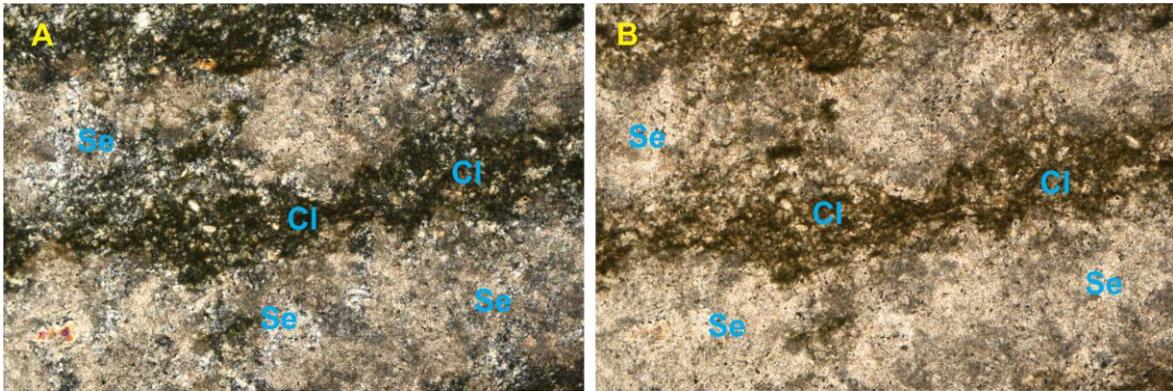


Figura 4.8. Fotografía con nícoles cruzados (A) y paralelos (B) mostrando bandeamiento composicional. La banda clara está compuesta por sericita y la banda oscura por clorita. Fotografías tomadas con objetivo 5X.

4.1.5. Muestra HU-05-19

La roca presenta una coloración verde oscuro con vesículas rellenas de cuarzo. En el afloramiento se presenta de manera masiva con un alto grado de fracturamiento (Figura 4.9).

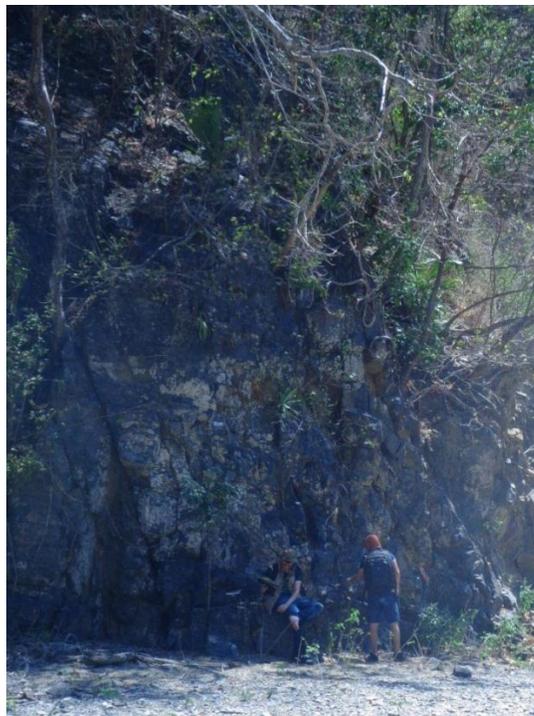


Figura 4.9. Basalto. A) Se muestra el afloramiento de la muestra HU-05-19, se aprecia el alto grado de fracturamiento de la unidad.

Petrográficamente presenta una textura amigdalóide (Fig. 4.10), pues hay vesículas rellenas de cuarzo amorfo y calcita. También se observa clorita que está invadiendo a las vesículas rellenas (Figura 4.11).

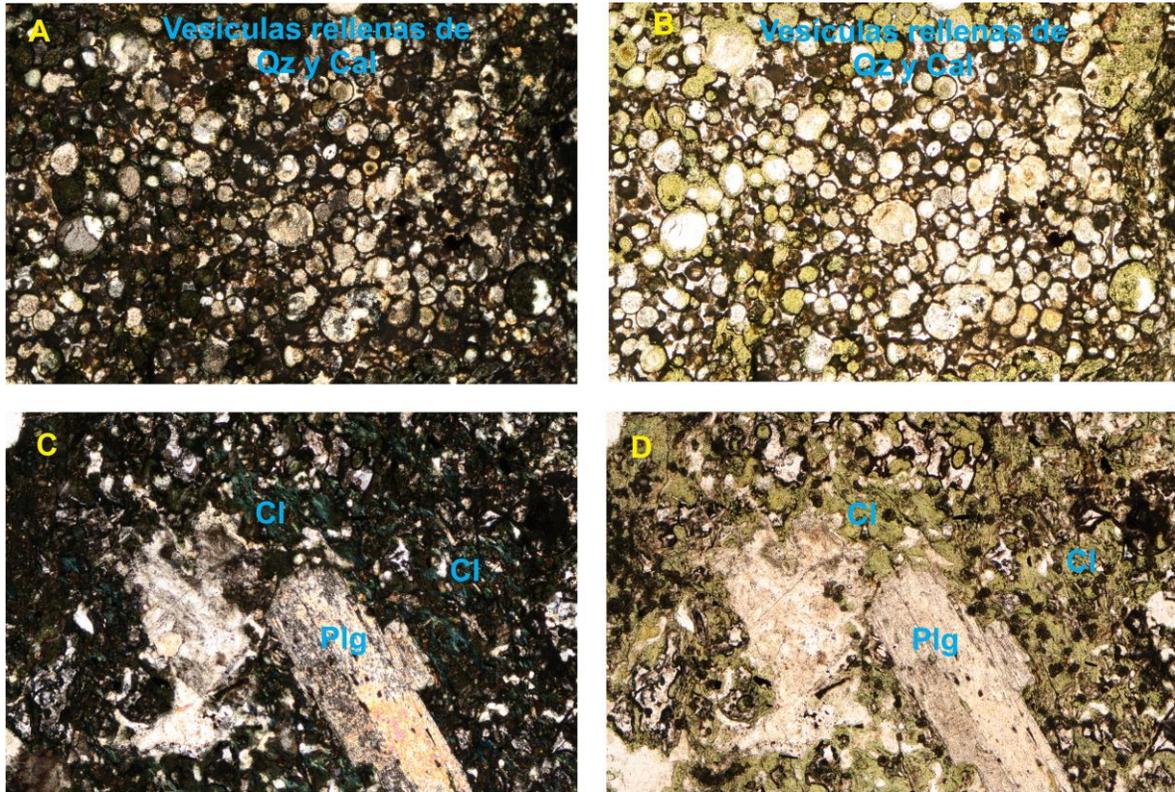


Figura 4.10. Textura amigdalóide, típica en basaltos (A. Luz polarizada, B. Luz natural). Cristal de plagioclasa, se muestran los bordes alterados y una matriz de clorita (C. Luz polarizada, D. Luz natural). Fotografías tomadas con objetivo 5X.

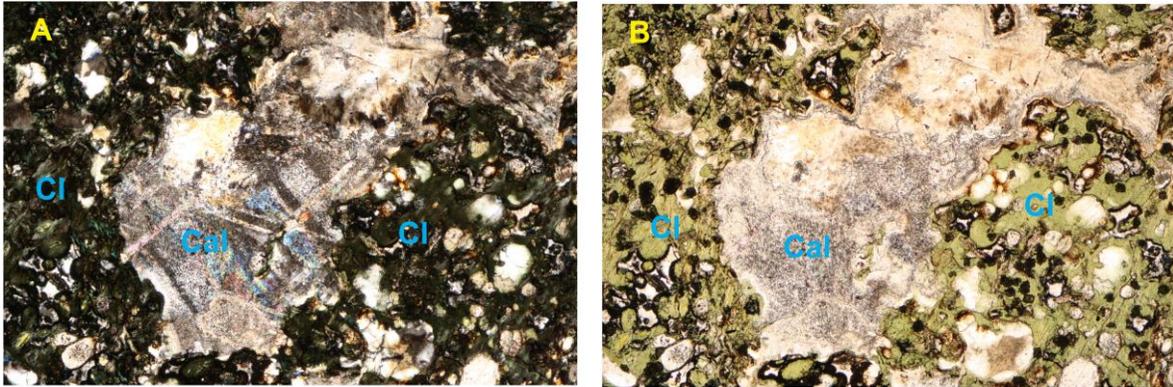


Figura 4.11. Fotografía con nicoles cruzados (A) y paralelos (B) donde se muestra un cristal de calcita rodeado por clorita.

Por lo expuesto anteriormente, podemos definir que se trata de una roca con un grado de alteración muy alto, en el que existe reemplazamiento mineralógico; aunque, aún se guarda la textura y parte de la mineralogía original. Esta roca se clasificó como un basalto alterado o metabasalto.

El mapa geológico propuesto se muestra en la página 67.

4.2. Inventario de PRM

Con las técnicas descritas en el capítulo tres, se obtuvo el inventario final de movimientos en masa que consiste en un total de 144 puntos, distribuidos de la siguiente manera: cuatro avalanchas, trece movimientos tipo caídas, cincuenta y tres deslizamientos, y setenta y ocho flujos (Figura 4.12).

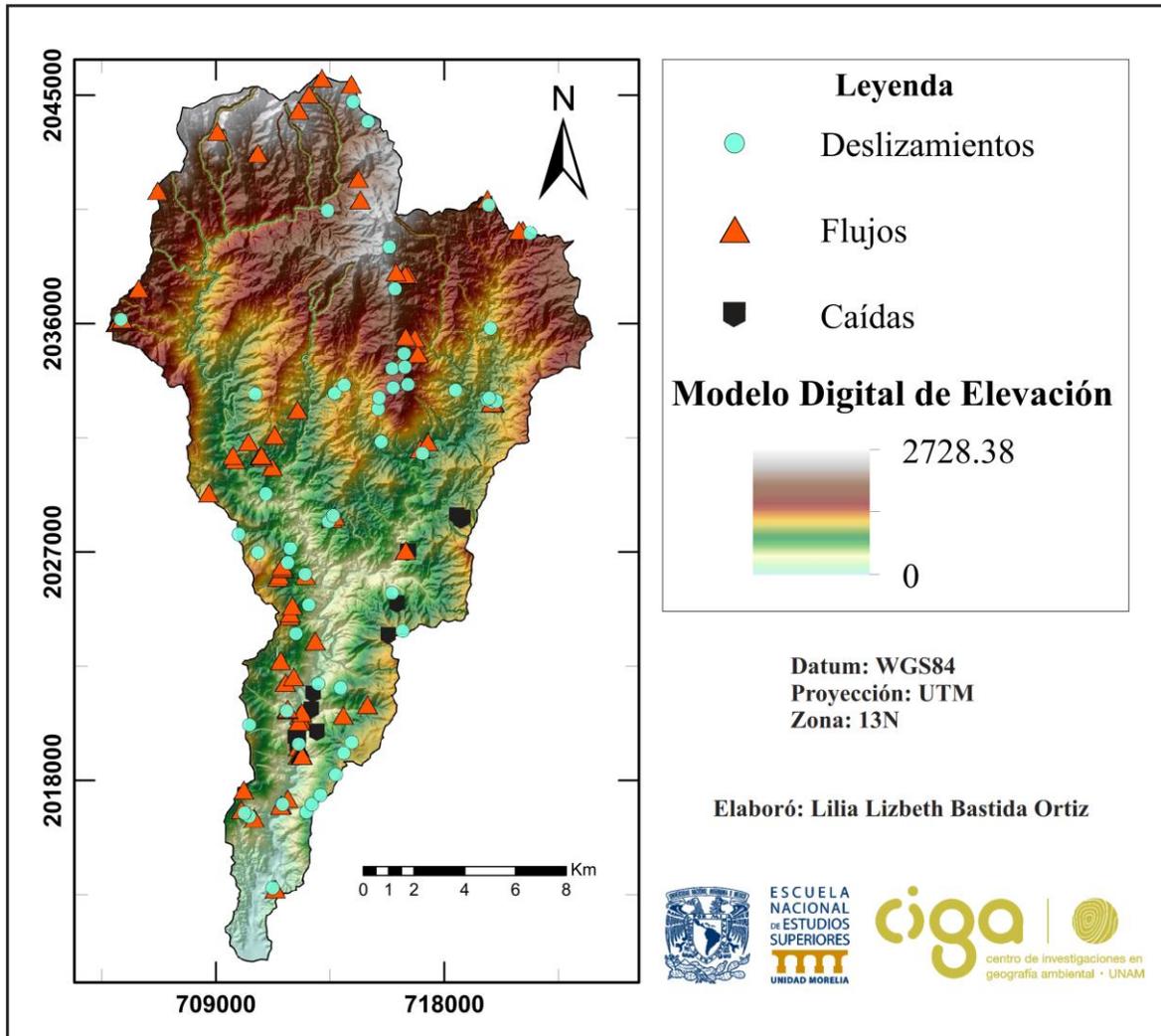


Figura 4.12. Inventario de movimientos en masa. Distribución de los distintos mecanismos de movimientos en masa en la cuenca Huahua (simbología adaptada del SGC, 2017).

Los movimientos en masa tipo avalancha no fueron vistos en campo, sin embargo, fueron identificados con ayuda de Google Earth Pro (Figura 4.13).

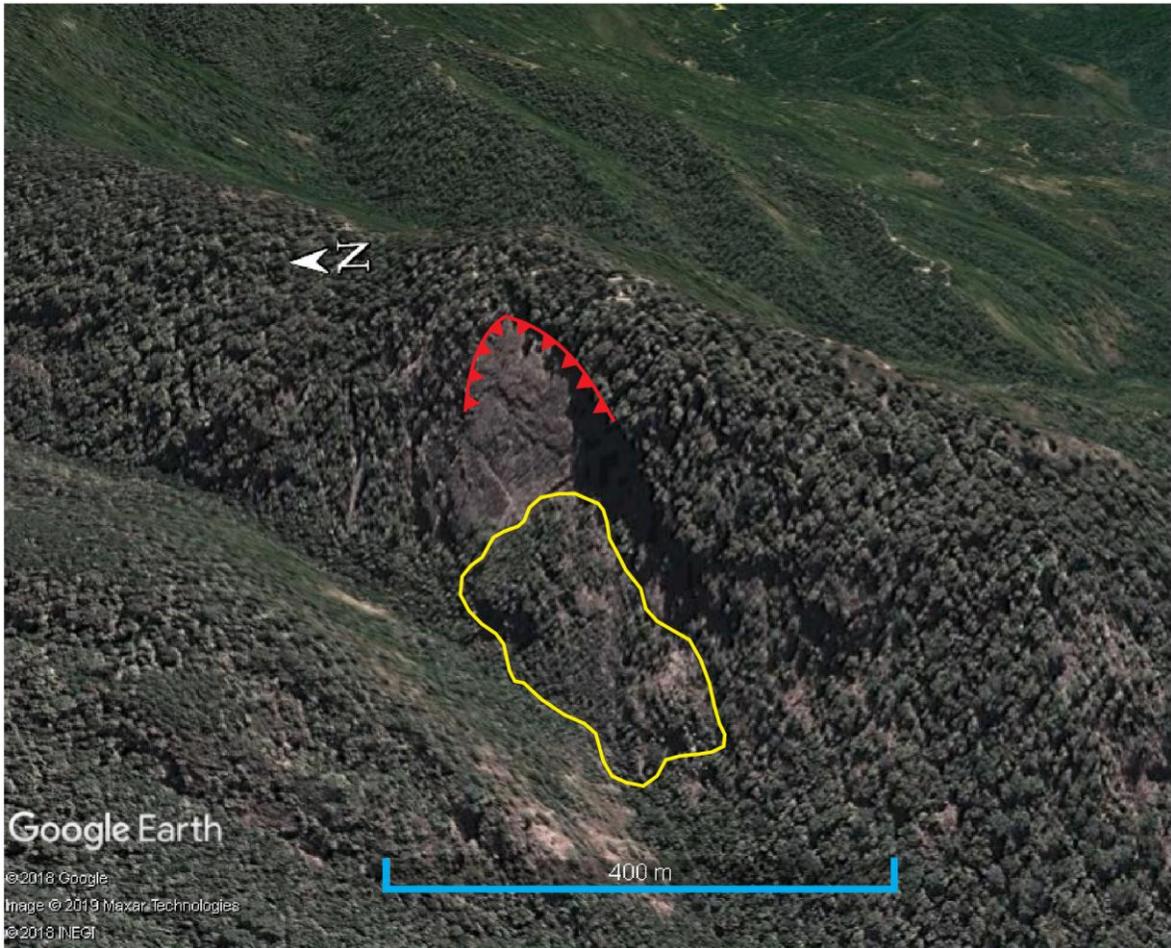


Figura 4.13. Movimiento en masa tipo avalancha de rocas. Se aprecia el escarpe (color rojo) y el depósito (polígono amarillo) cerca del Puerto El Tejamanil (coordenadas: 2,043,622.80 m N, 709,111.17 m E). Fecha de fotografía: 13 de diciembre de 2015.

Los movimientos tipo caída que más predominan son las caídas de roca (Figura 4.14), que se caracterizan por ser bloques de tamaños entre 10 cm y 1 m. En menor proporción se encuentran caídas de detritos (Figura 4.15).



Figura 4.14. Movimiento en masa tipo caída de rocas. Se observan bloques desprendidos (indicados con las flechas color amarillo).



Figura 4.15. Caída de detritos. Se observa la cicatriz del desprendimiento (indicada con flecha roja) y el depósito de detritos (color amarillo) (coordenadas: 2,020,958.02 m N, 712,762.46 m E). Fecha de fotografía: 30 de mayo de 2009.

La distribución de los movimientos tipo deslizamiento es: cinco deslizamientos rotacionales y cuarenta y ocho deslizamientos traslacionales. En campo se observó el deslizamiento traslacional del 4 de octubre de 2008 (Figura 4.16A). El depósito de este consiste en bloques de caliza de hasta 5 metros, así como también fragmentos de grava y arena (Fi. 4.16B y 4.16C).



Figura 4.16. Deslizamiento traslacional del cerro La Hujera, Aquila, Michoacán. A) Deslizamiento traslacional visto en campo. B) Bloques de caliza, gravas y arenas del depósito del deslizamiento traslacional. C) Vista lateral del depósito. D) Deslizamiento traslacional visto desde Google Earth Pro (coordenadas: 2,043,622.80m N, 709,111.17M E). Fecha de imagen: 30 de diciembre de 2016.

Los deslizamientos rotacionales no se observaron en campo, sin embargo, fueron identificados con ayuda de Google Earth Pro (Fig. 4.17).



Figura 4.17. Deslizamiento rotacional. Se alcanza a apreciar la diferencia entre la imagen de antes y después. En la imagen de después, se aprecia menos vegetación en comparación con la imagen de antes del movimiento en masa. Coordenadas: 709,918 m E; 2,023,467.13 m N.

Por otro lado, los movimientos tipo flujo son flujos de detritos que están caracterizados por material de grava y arena. En campo con mayor frecuencia se observaron flujos, los cuales son de tamaños pequeños (poco volumen de material desprendido, aproximadamente 50 m^3) (Fig. 4.18, 4.19).

En las figuras 4.20 y 4.21 se muestran flujos identificados en fotografías de Google Earth Pro.

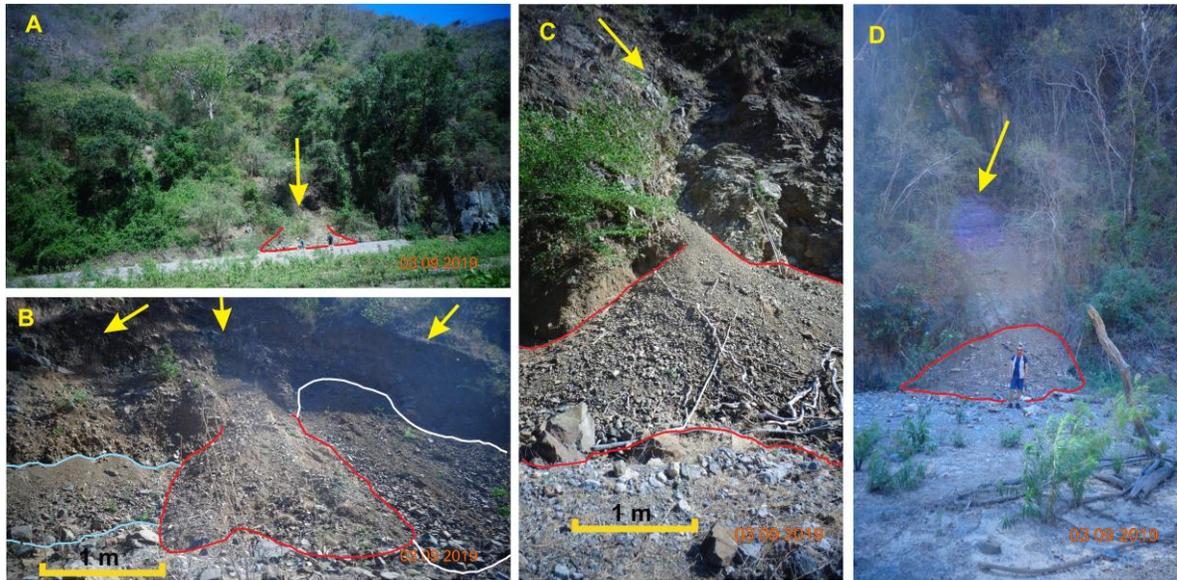


Figura 4.18. Flujos de detritos. Las flechas amarillas indican la zona de escarpe y los depósitos son indicados de color rojo, blanco y azul. A) Flujo de detritos de aproximadamente 20 m^3 . B) Flujos de detritos pequeños. C) Deposito de flujo de detritos, se alcanzan a apreciar las gravas y arenas. D) Deposito de flujo de detritos de aproximadamente 15 m^3 .



Figura 4.19. Flujos de detritos. Las flechas amarillas indican la zona de escarpe y los depósitos son indicados de color rojo. A) Flujos de detritos canalizados por las zonas de escurrimiento. B) Flujo

de detritos de aproximadamente 18 m^3 . C) Movimiento en masa en andesita. D) Deposito de flujo sobre el río Huahua.



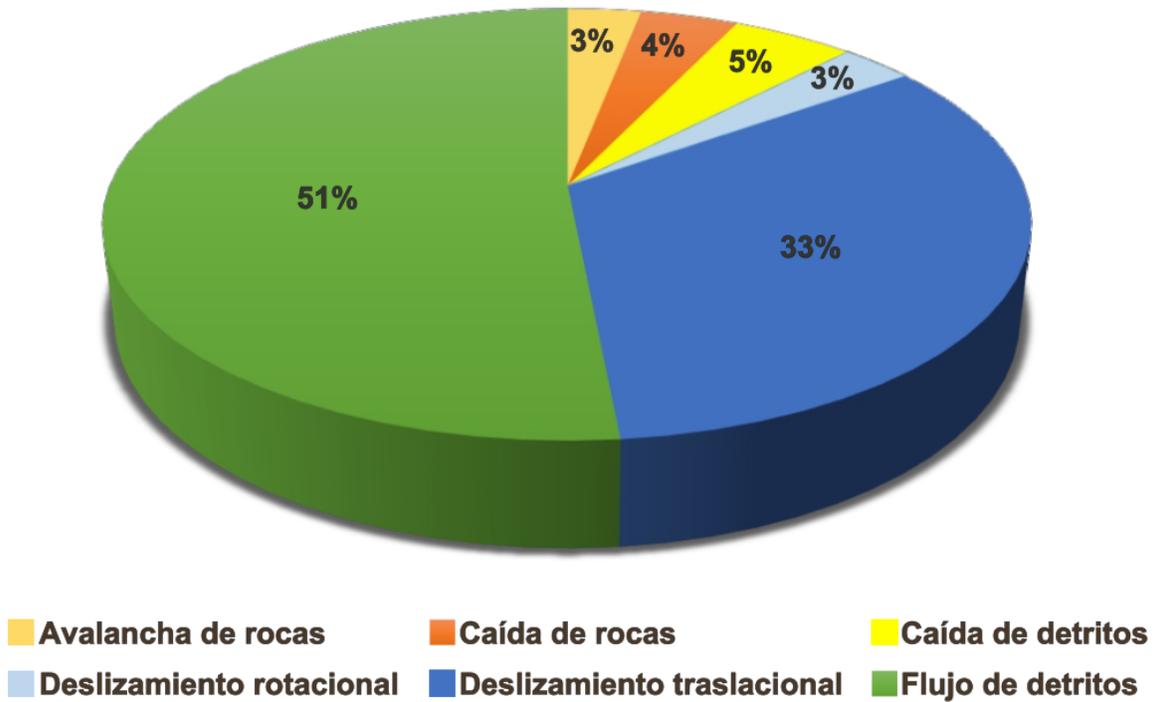
4.20. Flujos. Se aprecia la ocurrencia de un conjunto de flujos en una ladera con fuerte pendiente. Coordenadas: 705,240.26 m E; 2,036,161.09 m N.



4.21. Flujo de detritos. Se aprecia zona de escarpe y el depósito del flujo. Coordenadas: 712,902.53 m E; 2,023,467.13 m N. Fecha de imagen: mayo de 2009.

En la gráfica 4.1 se muestra el porcentaje que representa cada tipo de PRM en el área de estudio.

Distribución de movimientos en masa



Grafica 4.1. Distribución en porcentaje de los movimientos en masa, del inventario en el área de estudio

4.3. Factores condicionantes

4.3.1. Distancia entre lineamientos

En la Figura 4.29, se observan los veintinueve lineamientos identificados en toda el área de estudio. Las fallas fueron trazadas respecto a la propuesta cartográfica-geológica, E13-6-9, del SGM (2002) y del mapa geológico de Centeno-García (2011).

El mapa de las áreas de influencia de los lineamientos se muestra en la Figura 4.20, éste fue hecho de acuerdo a la Figura 4.29.

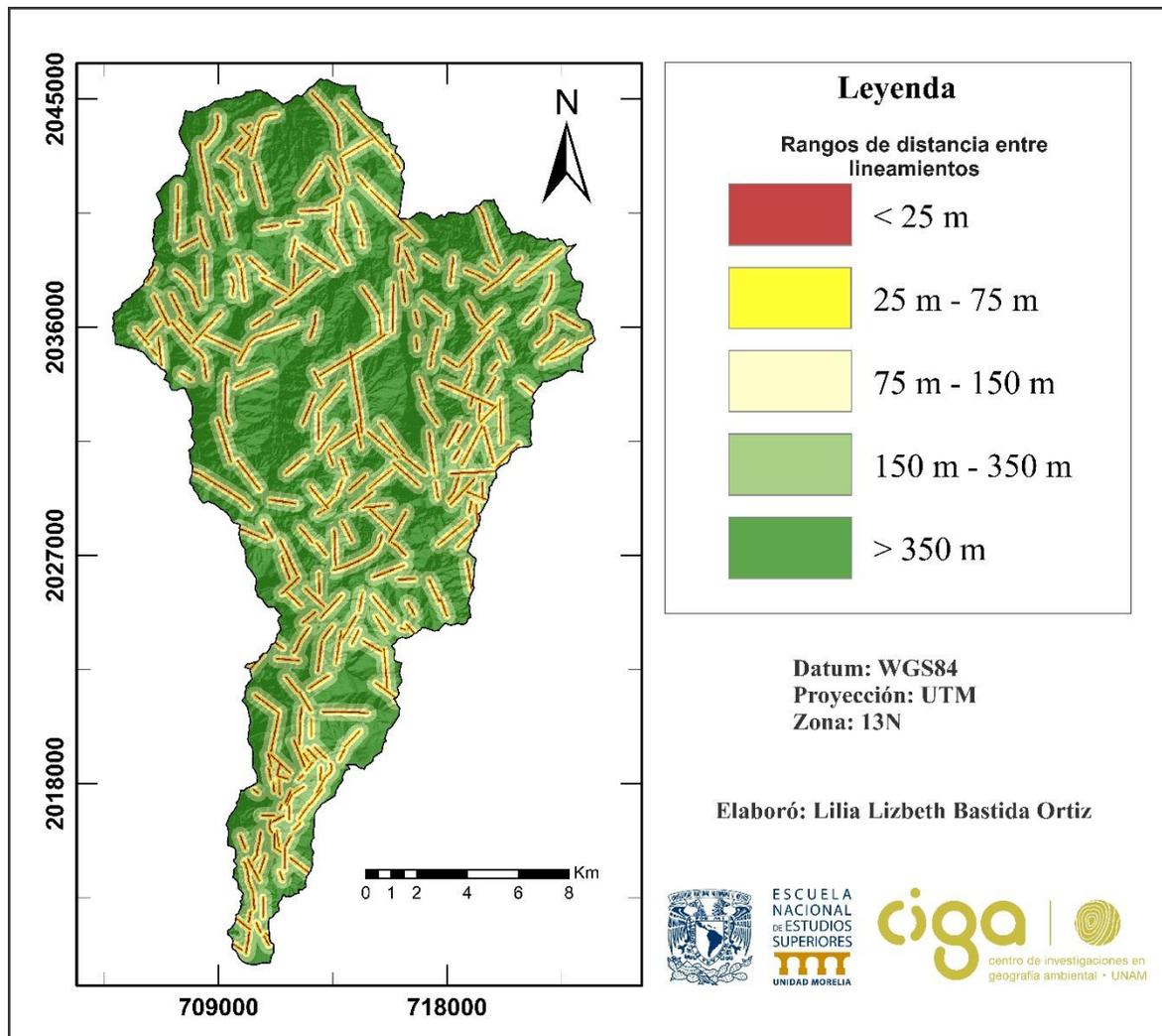


Figura 4.20. Mapa de distancia entre lineamientos. Se muestran los distintos rangos de distancia a lineamientos, propuestos para el análisis de susceptibilidad.

4.3.2. Suelos

Los suelos más abundantes en la cuenca son Luvisoles de textura fina con un 40%, Luvisoles de textura media con un 30% y Regosoles de textura media con un 27% (Figura 4.21).

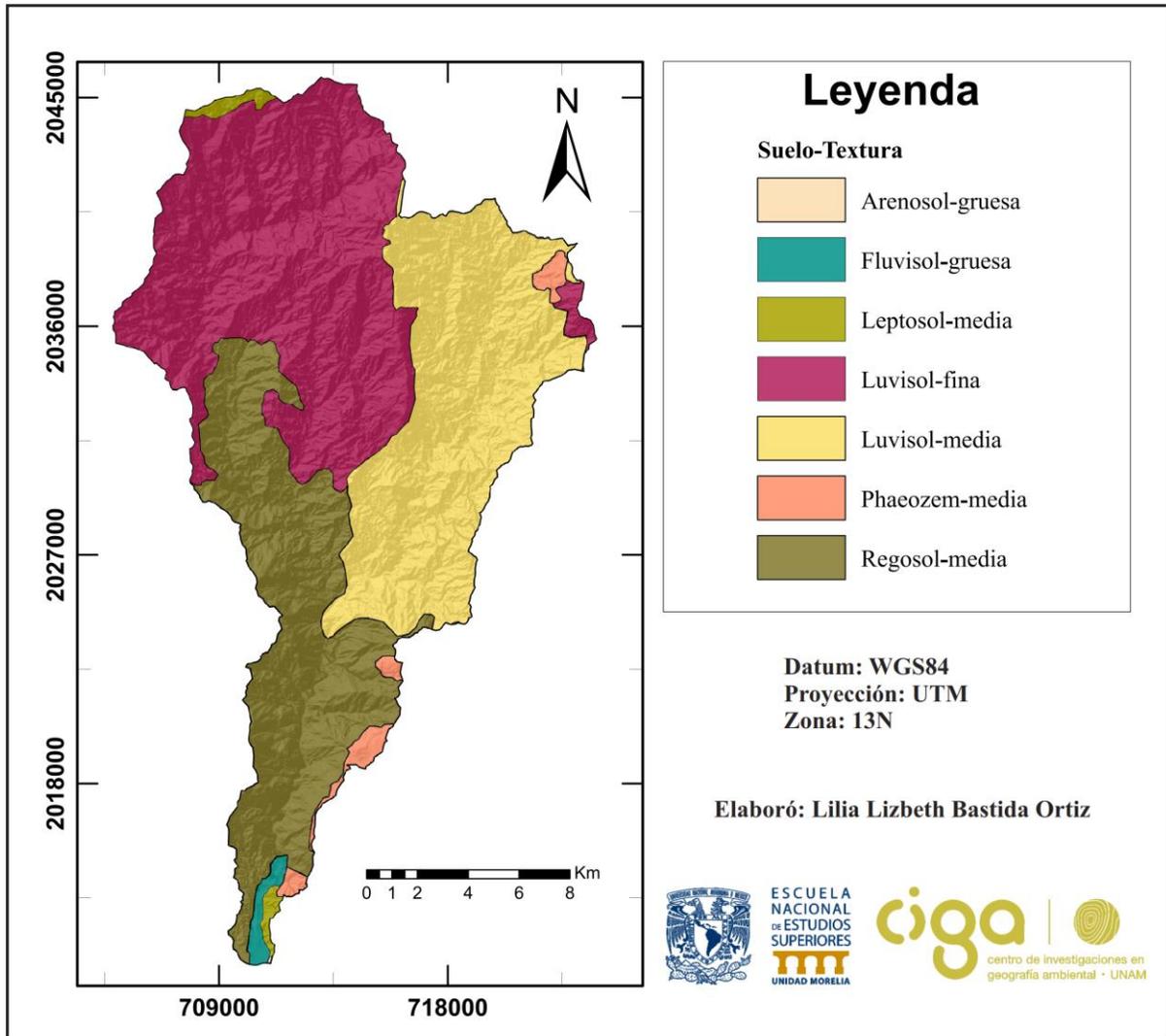


Figura 21. Mapa de suelos. Se muestra la distribución espacial de los distintos tipos de suelo presentes en la cuenca Huahua. Fuente: INEGI (2013).

4.3.3. *Uso de suelo y vegetación*

Las dos coberturas vegetales más abundantes en el área de estudio son el Bosque de Pino (49%) y la Selva mediana subcaducifolia (26%); el porcentaje restante se distribuye en las otras categorías (Fig. 4.22).

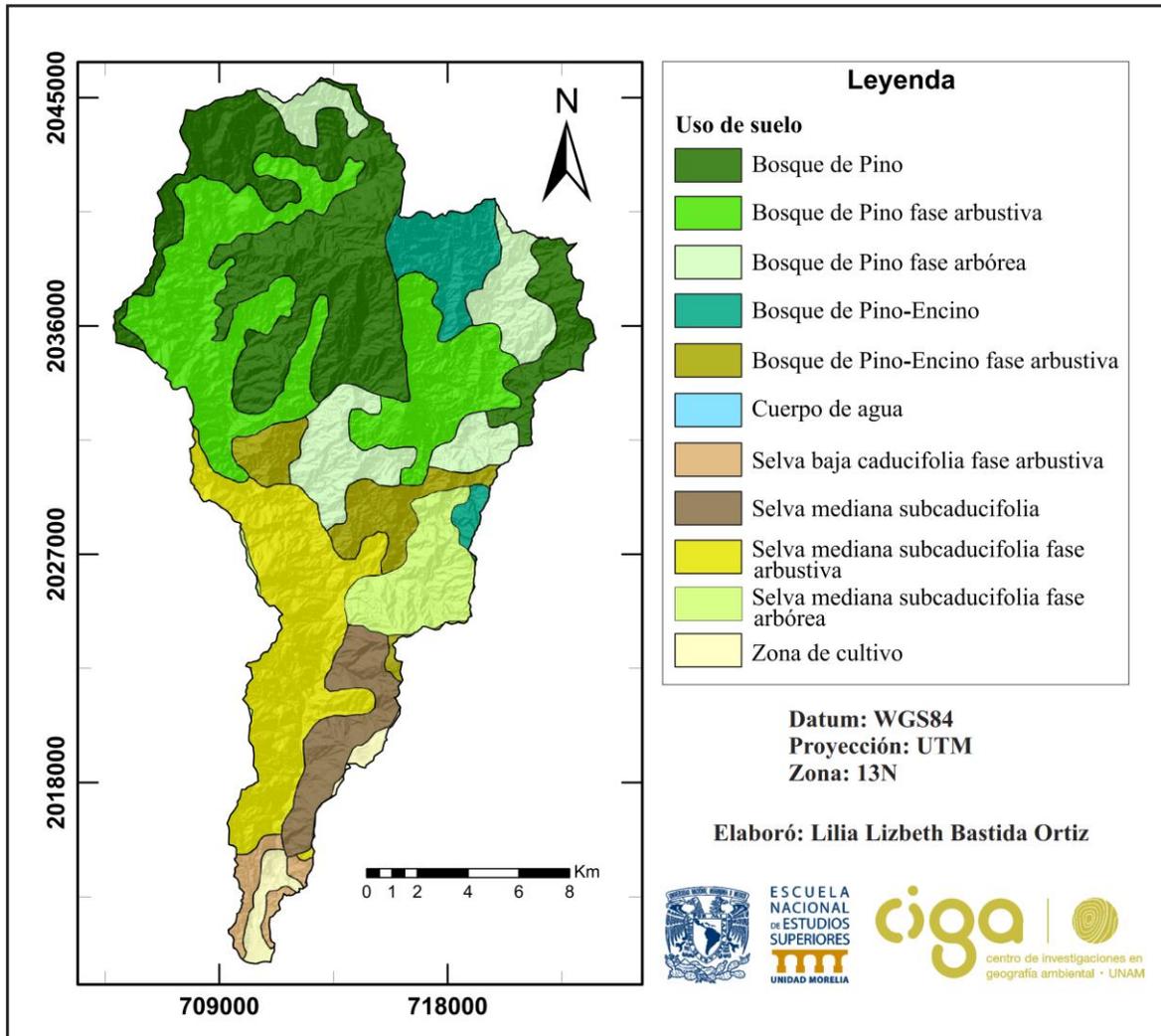


Figura 4.22. Mapa de uso de suelo. Se muestran, de manera espacial, los distintos usos del suelo en el área de estudio. Fuente: INEGI (2013).

4.3.4. Pendientes

Las pendientes predominantes (68%) en la cuenca Huahua son entre 20°-30° y 30°-40°. Las pendientes con inclinaciones entre 10°-20° se encuentran en un 19%; y el porcentaje restante se distribuye en grados de pendiente menor y tendiente a cero (Figura 4.23).

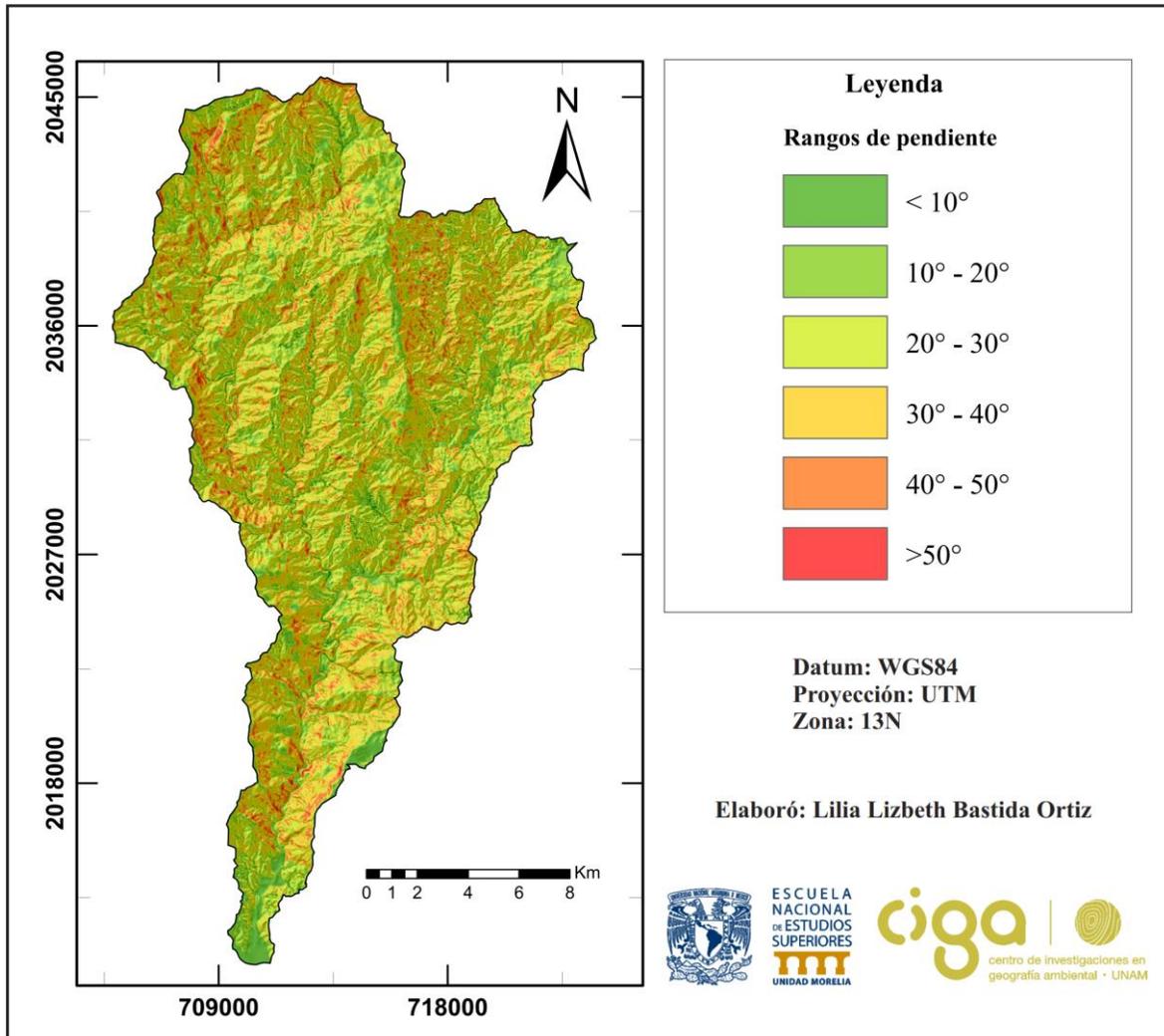


Figura 4.23. Mapa de pendientes. Se muestra la distribución espacial de los distintos rangos de pendiente presentes en la zona de estudio.

4.3.5. *Relieve relativo*

Los desniveles que más predominan en el área de estudio son de 100 a 200 m, abarcando un 73% del área de estudio; el 15% del área lo abarcan los desniveles de 200 a 300 m; los desniveles de 50 a 100 m están presentes en un 11%. El porcentaje restante los abarcan los desniveles menores a 50 m y los mayores a 300 m (Fig. 4.24).

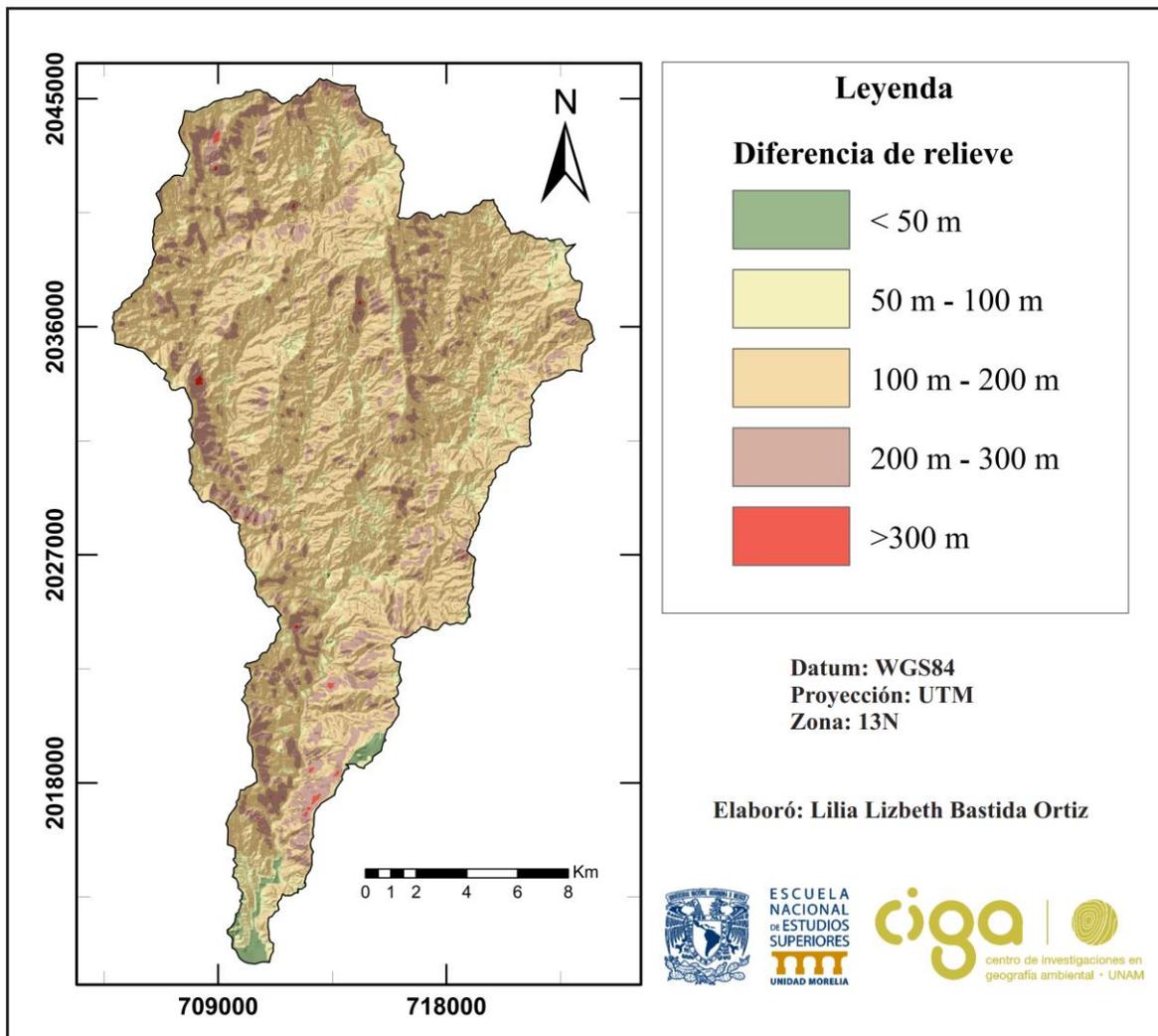


Figura 4.24. Mapa de relieve relativo. Se muestran los distintos rangos de desniveles en la cuenca Huahua.

4.3.6. Orientación de la ladera

Las orientaciones predominantes en el área de estudio son: sur (15.6%), oeste (15%), suroeste (14.5%), este (14%) y sureste (13.6%). En menor proporción se encuentran las orientaciones restantes (entre 11% y 0.002%) (Fig.4.25).

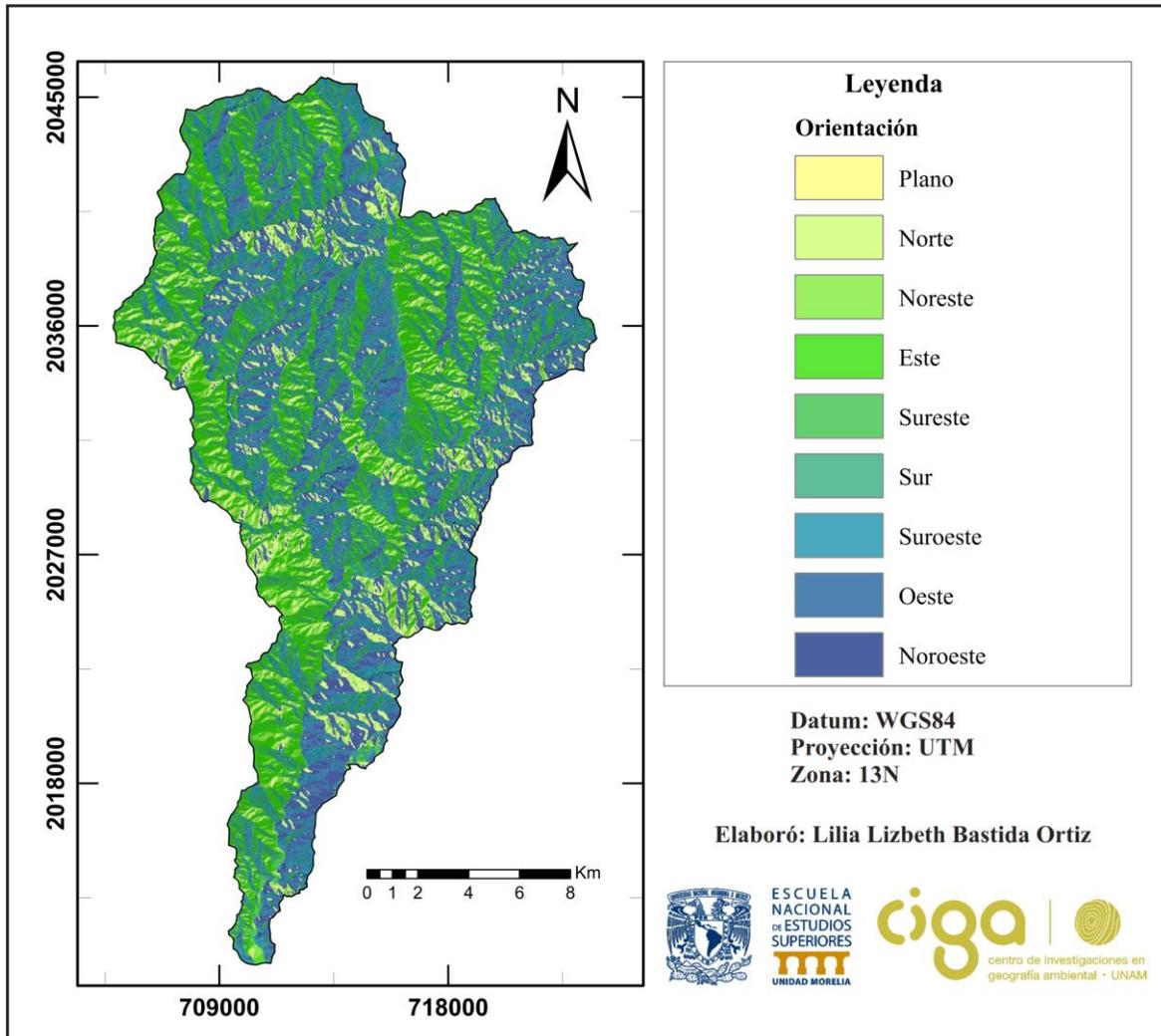


Figura 4.25. Mapa de orientación. Se muestra la distribución espacial de las categorías de orientación en la zona de estudio.

4.3.7. Curvatura

La curvatura está concentrada en convexa (50%) y cóncava (49%). La curvatura plana sólo abarca el 1% del área de estudio (Fig.4.26).

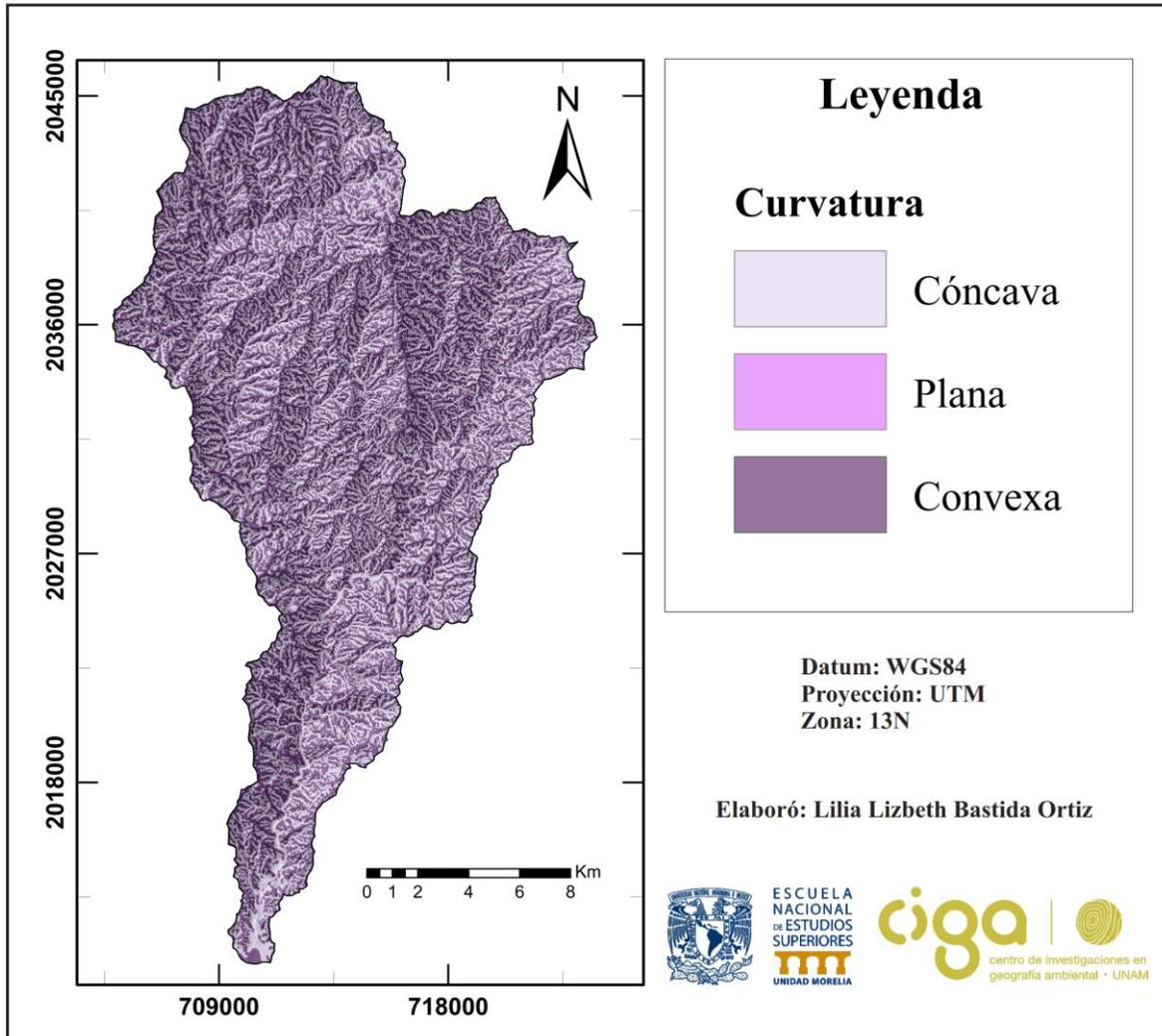


Figura 4. 26. Mapa de pendientes. Se muestra la distribución espacial de los distintos rangos de pendiente presentes en la zona de estudio.

4.3.8. Distancia a drenaje

Los tipos de drenaje que se encuentra en el área de estudio son principalmente de dos tipos: dendrítico en la parte noreste y sur; y rectangular en la parte noroeste de la cuenca.

En la Figura 4.27 se muestran las redes de drenaje con el área de influencia propuesta en la Tabla 3.5.

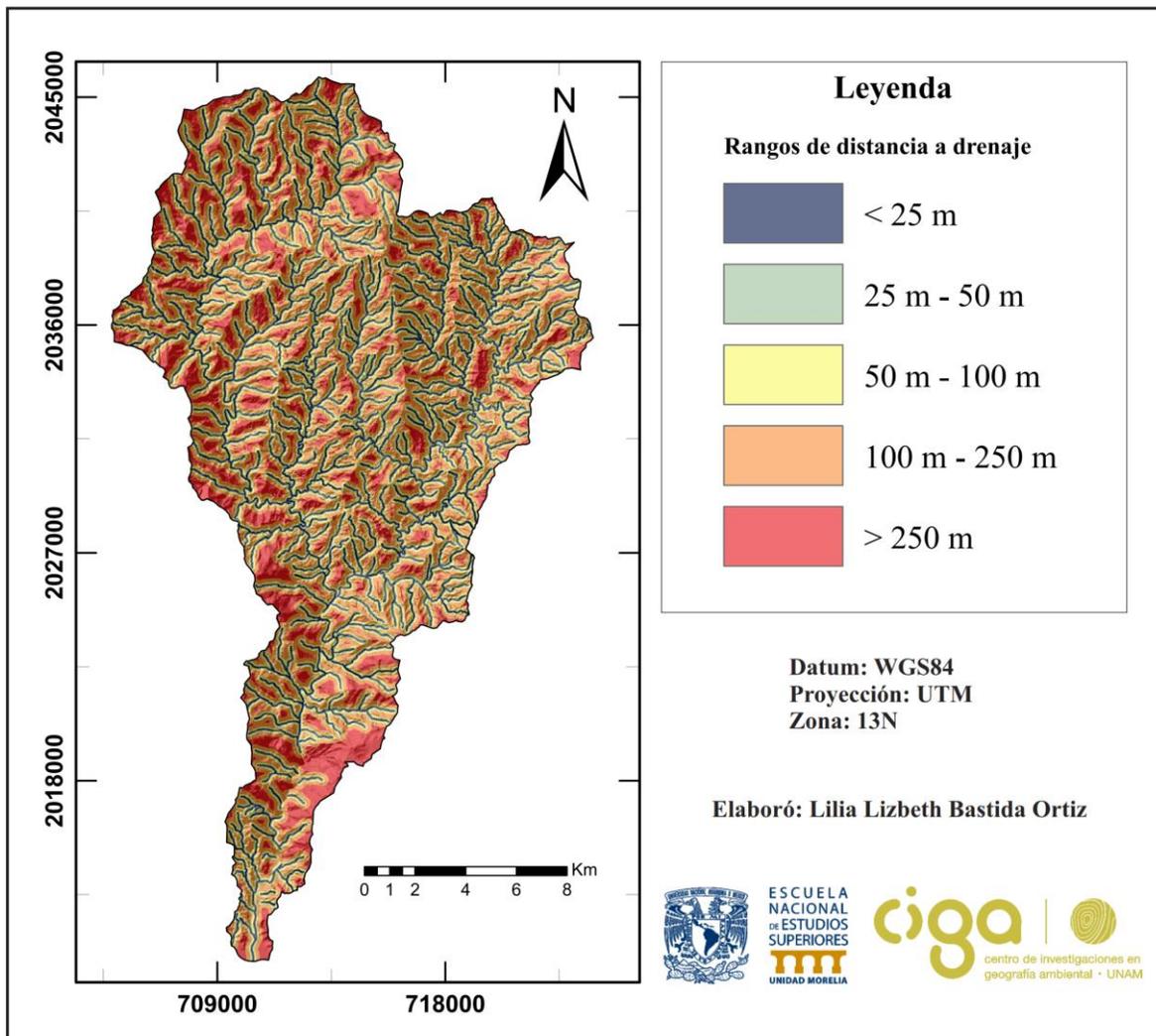


Figura 4.27. Mapa de distancia a drenaje. Se muestran los distintos rangos de distancia a drenaje, propuestos para el análisis de susceptibilidad.

4.3.9. Distancia a vías

Las vías que se encuentran en la cuenca son de tipo terracería y consisten en pequeños caminos de aproximadamente seis metros de ancho. Los caminos generalmente están en las partes altas de la cuenca, esto debido a la forma estrecha que tiene el área de estudio.

En la Figura 4.28 se muestran los caminos con el área de influencia propuesta en la Tabla 3.6.

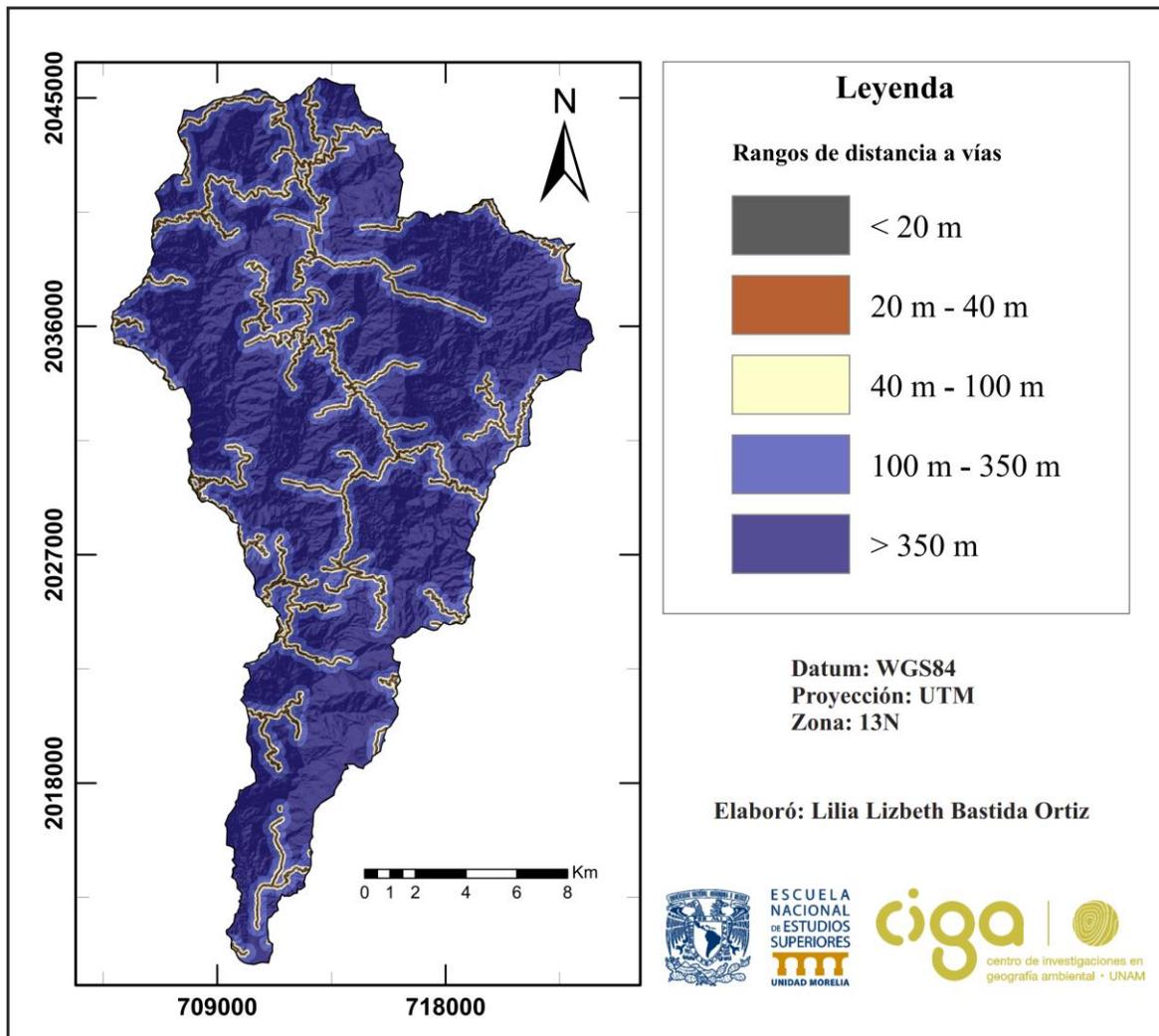


Figura 4.28. Mapa de distancia a vías. Se muestran los distintos rangos de distancia a vías, propuestos para el análisis de susceptibilidad en la cuenca Huahua.

4.3.10. Geología

Tomando en cuenta el contexto geológico, los análisis petrográficos y cartografía de base del SGM (2002) y Centeno-García et al. (2011), en la zona de estudio, se propone la cartografía geológica de la Figura 4.29.

La brecha andesítica es la unidad que tiene la mayor superficie de la geología del área de estudio, 232.7 km²; representando el 76% de la superficie de la zona. Esta unidad está presente en las muestras HU-02-19 y HU-03-19; puede corresponder a la unidad de rocas volcánicas y sedimentarias del Cretácico inferior?, reportada por Grajales y López (1984); Pantoja y Estrada (1986); Garduño-Monroy *et al.* (1999); Centeno-García *et al.* (2003); mapa E13-3 del SGM (Rosas-Helguera *et al.*, 1999); mapa del SGM (2002) (Formación Tecalitlán) y Centeno-García (2011).

La arenisca tiene una superficie de 2.6 km², representa el 1% de la superficie de la zona de estudio. De acuerdo con las características que presenta la muestra HU-01-19, ésta podría corresponder a una sucesión fluvial, denominada Chuta-Neixpa por Centeno-García (2011), de conglomerados, areniscas y limolitas que reportan Ferrusquía *et al.* (1978), Alvarado-Mendez *et al.* (2006), y Centeno-García (2011).

Por otro lado, la unidad de caliza, tiene una superficie de 55.6 km², representa el 18% de la superficie de la zona. Esta unidad, podría pertenecer a la caliza masiva del Cretácico inferior?, de la propuesta de Centeno-García (2011).

Finalmente, los granitoides abarcan una superficie de 11.8 km², lo cual representa el 4% de la superficie del área de estudio. Estos cuerpos plutónicos, podrían ser parte del Batolito de Michoacán-Guerrero, reportado por el SGM (2002), quién propone su emplazamiento a fines del Cretácico y principios del Paleógeno; y los describe como de composición granítica, granodiorítica, diorítica con facies de monzonitas y tonalitas (SGM, 2002).

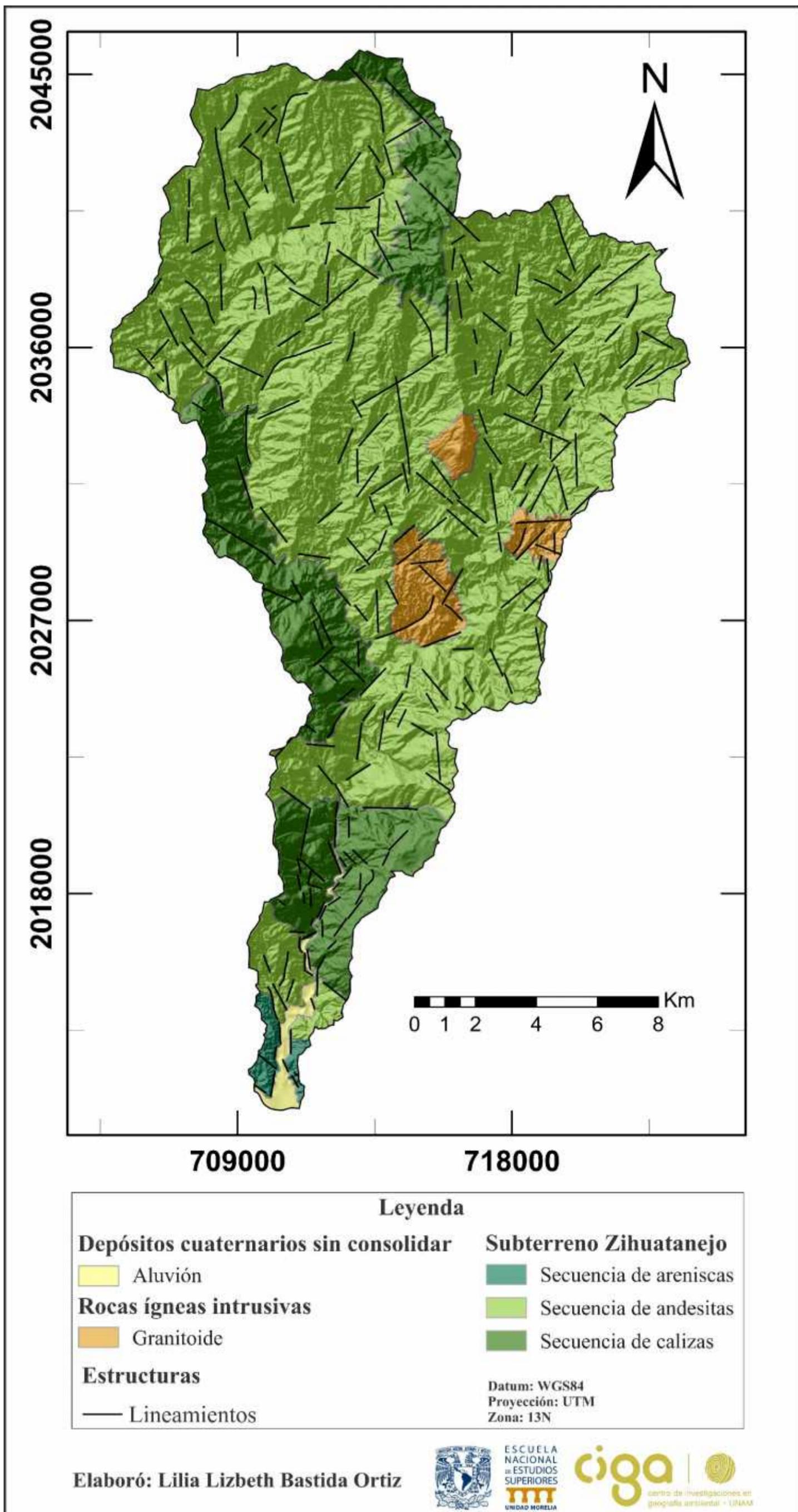


Figura 4.29. Mapa geológico de la cuenca Huahua. Se observan las distintas unidades propuestas, así como también, los lineamientos identificados.

4.4. Modelos de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento

Luego de aplicar las metodologías descritas en el apartado 3.3.2 de este trabajo, con ayuda del software ArcMap se obtuvieron los valores de W^+ , C_w y FR (Tablas 4.2 y 4.3).

Tabla 4.2. Valores obtenidos para la muestra aleatoria uno, de movimientos en masa tipo deslizamiento.

Factor	Clases	Número de píxeles en la clase	Número de deslizamientos en la clase	W^+	W^-	C_w	FR
Geología	Brecha andesítica	581783	24	-0.31	0.62	-0.93	0.73
	Caliza	139010	17	0.78	-0.30	1.08	2.17
	Granitoide	29532	2	0.19	-0.01	0.19	1.20
	Aluvión	7077	0	0.00	0.01	-0.01	0.00
	Arenisca	6612	0	0.00	0.01	-0.01	0.00
Suelo	Luvisol-fina	302717	11	-0.44	0.21	-0.65	0.65
	Luvisol-media	229220	9	-0.36	0.12	-0.48	0.70
	Regosol-media	205305	20	0.55	-0.31	0.86	1.73
	Phaeozem-media	13850	2	0.94	-0.03	0.97	2.57
	Leptosol-media	6811	1	0.96	-0.01	0.97	2.61
	Fluvisol-gruesa	6028	0	0.00	0.01	-0.01	0.00
	Arenosol-gruesa	89	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Uso de suelo	Bosque de Pino	202749	5	-0.83	0.18	-1.01	0.44
	Bosque de Pino fase arbustiva	171583	12	0.22	-0.07	0.29	1.24
	Selva mediana subcaducifolia fase arbustiva	115557	13	0.69	-0.20	0.89	2.00
	Bosque de Pino fase arbórea	85704	4	-0.19	0.02	-0.21	0.83
	Selva mediana subcaducifolia fase arbórea	43308	3	0.21	-0.01	0.22	1.23
	Bosque de Pino-Encino fase arbustiva	40592	0	0.00	0.05	-0.05	0.00
	Bosque de Pino-Encino	40322	0	0.00	0.05	-0.05	0.00
	Selva mediana subcaducifolia	38133	5	0.85	-0.07	0.92	2.33
	Zona de cultivo	13687	1	0.26	-0.01	0.27	1.30
	Selva baja caducifolia fase arbustiva	12383	0	0.00	0.02	-0.02	0.00
	Cuerpo de agua	2	0	0.00	0.00	0.00	0.00

Tabla 4.2 (continuación).

Factor	Clases	Número de píxeles en la clase	Número de deslizamientos en la clase	W ⁺	W ⁻	Cw	FR
Pendiente	<10°	52632	0	0.00	0.07	-0.07	0.00
	10° - 20°	143860	2	-1.40	0.16	-1.56	0.25
	20° - 30°	271475	12	-0.24	0.11	-0.35	0.79
	30° - 40°	244266	22	0.47	-0.33	0.80	1.60
	40° - 50°	50637	7	0.90	-0.11	1.01	2.46
	>50°	1182	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Orientación	Plano (-1°)	154	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	N (337°-360°,0°-22°)	57935	1	-1.18	0.06	-1.24	0.31
	NE (22°-67°)	66929	7	0.62	-0.09	0.71	1.86
	E (67°-112°)	107422	6	-0.01	0.00	-0.01	0.99
	SE (112°-157°)	103808	5	-0.16	0.02	-0.18	0.86
	S (157°-202°)	118915	4	-0.51	0.07	-0.59	0.60
	SO (202°-247°)	111059	6	-0.04	0.01	-0.05	0.96
	O (247°-292°)	113928	7	0.09	-0.02	0.10	1.09
NO (292°-337°)	83902	7	0.39	-0.06	0.46	1.48	
Curvatura	Cóncava (-7.6 - -0.0001)	380217	19	-0.12	0.11	-0.22	0.89
	Plana (-0.0001 - 0.0001)	66	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	Convexa (>0.0001)	383769	24	0.11	-0.12	0.22	1.11
Relieve relativo	<50m	8066	0	0.00	0.01	-0.01	0.00
	50m - 100m	85031	0	0.00	0.12	-0.12	0.00
	100m - 200m	555383	26	-0.18	0.37	-0.55	0.83
	200m - 300m	114102	17	0.97	-0.34	1.32	2.65
	>300m	1470	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Distancia a ríos	<25m	98477	2	-1.02	0.09	-1.11	0.36
	25m - 50m	79865	3	-0.40	0.04	-0.44	0.67
	50m - 100m	162464	7	-0.27	0.06	-0.33	0.77
	100m - 250m	300788	20	0.17	-0.13	0.29	1.18
	>250m	122426	11	0.47	-0.12	0.59	1.60
Distancia a vías	<20m	34279	5	0.95	-0.08	1.03	2.59
	20m - 40m	18163	4	1.36	-0.07	1.44	3.91
	40m - 100m	57866	2	-0.49	0.03	-0.52	0.61
	100m - 350m	192943	10	-0.08	0.03	-0.11	0.92
	>350m	460769	22	-0.16	0.21	-0.37	0.85
Distancia a lineamientos	<25m	39139	1	-0.79	0.03	-0.82	0.45
	25m - 75m	72370	3	-0.31	0.03	-0.33	0.74
	75m - 150m	110738	6	-0.04	0.01	-0.04	0.96
	150m - 350m	261211	16	0.08	-0.05	0.13	1.09
	>350m	280562	17	0.07	-0.05	0.12	1.08

Tabla 4.3. Valores obtenidos para la muestra aleatoria dos, de movimientos en masa tipo deslizamiento.

Factor	Clases	Número de píxeles en la clase	Número de deslizamientos en la clase	W+	W-	Cw	FR	
Geología	Brecha andesítica	581783	27	-0.19	0.44	-0.64	0.82	
	Caliza	139010	15	0.65	-0.23	0.88	1.92	
	Granitoide	29532	1	-0.51	0.02	-0.52	0.60	
	Aluvión	7077	0	0.00	0.01	-0.01	0.00	
	Arenisca	6612	0	0.00	0.01	-0.01	0.00	
Suelo	Luvisol-fina	302717	11	-0.44	0.21	-0.65	0.65	
	Luvisol-media	229220	11	-0.16	0.06	-0.22	0.85	
	Regosol-media	205305	18	0.44	-0.23	0.67	1.56	
	Phaeozem-media	13850	2	0.94	-0.03	0.97	2.57	
	Leptosol-media	6811	1	0.96	-0.01	0.97	2.61	
	Fluvisol-gruesa	6028	0	0.00	0.01	-0.01	0.00	
	Arenosol-gruesa	89	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
Uso de suelo	Bosque de Pino	202749	5	-0.83	0.18	-1.01	0.44	
	Bosque de Pino fase arbustiva	171583	12	0.22	-0.07	0.29	1.24	
	Selva mediana subcaducifolia fase arbustiva	115557	13	0.69	-0.20	0.89	2.00	
	Bosque de Pino fase arbórea	85704	3	-0.47	0.05	-0.52	0.62	
	Selva mediana subcaducifolia fase arbórea	43308	2	-0.20	0.01	-0.21	0.82	
	Bosque de Pino- Encino fase arbustiva	40592	0	0.00	0.05	-0.05	0.00	
	Bosque de Pino- Encino	40322	2	-0.13	0.01	-0.13	0.88	
	Selva mediana subcaducifolia	38133	5	0.85	-0.07	0.92	2.33	
	Zona de cultivo Selva baja caducifolia fase arbustiva	13687	1	0.26	-0.01	0.27	1.30	
	12383	0	0.00	0.02	-0.02	0.00		
	Cuerpo de agua	2	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Pendiente	<10°	52632	0	0.00	0.07	-0.07	0.00
		10° - 20°	143860	1	-2.09	0.19	-2.28	0.12
20° - 30°		271475	13	-0.16	0.08	-0.24	0.85	
30° - 40°		244266	21	0.42	-0.28	0.71	1.53	
40° - 50°		50637	8	1.03	-0.14	1.17	2.81	
>50°		1182	0	0.00	0.00	0.00	0.00	

Tabla 4.3 (continuación)

Factor	Clases	Número de píxeles en la clase	Número de deslizamientos en la clase	W+	W-	Cw	FR
Orientación	Plano (-1°)	154	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	N (337°-360°,0°-22°)	57935	1	-1.18	0.06	-1.24	0.31
	NE (22°-67°)	66929	5	0.28	-0.03	0.32	1.33
	E (67°-112°)	107422	7	0.15	-0.03	0.17	1.16
	SE (112°-157°)	103808	4	-0.38	0.05	-0.43	0.68
	S (157°-202°)	118915	4	-0.51	0.07	-0.59	0.60
	SO (202°-247°)	111059	7	0.11	-0.02	0.13	1.12
	O (247°-292°)	113928	8	0.22	-0.04	0.27	1.25
NO (292°-337°)	83902	7	0.39	-0.06	0.46	1.48	
Curvatura	Cóncava (-7.6 -- 0.0001)	380217	17	-0.23	0.19	-0.42	0.79
	Plana (-0.0001 - 0.0001)	66	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	Convexa (>0.0001)	383769	26	0.19	-0.23	0.42	1.20
Relieve relativo	<50m	8066	0	0.00	0.01	-0.01	0.00
	50m - 100m	85031	0	0.00	0.12	-0.12	0.00
	100m - 200m	555383	24	-0.26	0.48	-0.75	0.77
	200m - 300m	114102	19	1.08	-0.42	1.51	2.96
	>300m	1470	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Distancia a ríos	<25m	98477	3	-0.61	0.07	-0.68	0.54
	25m - 50m	79865	4	-0.12	0.01	-0.13	0.89
	50m - 100m	162464	5	-0.60	0.12	-0.72	0.55
	100m - 250m	300788	18	0.06	-0.04	0.10	1.06
	>250m	122426	13	0.63	-0.19	0.82	1.89
Distancia a vías	<20m	34279	6	1.13	-0.10	1.24	3.11
	20m - 40m	18163	1	-0.02	0.00	-0.02	0.98
	40m - 100m	57866	3	-0.08	0.01	-0.09	0.92
	100m - 350m	192943	11	0.01	0.00	0.02	1.01
	>350m	460769	22	-0.16	0.21	-0.37	0.85
Distancia a lineamientos	<25m	39139	2	-0.10	0.00	-0.10	0.91
	25m - 75m	72370	3	-0.31	0.03	-0.33	0.74
	75m - 150m	110738	5	-0.22	0.03	-0.25	0.80
	150m - 350m	261211	15	0.02	-0.01	0.03	1.02
	>350m	280562	18	0.13	-0.08	0.22	1.14

Con los valores de las Tablas 4.2 y 4.3 se hicieron los cálculos del LSI y posteriormente se generaron las curvas de éxito de las dos muestras aleatorias.

En general, las curvas presentan un buen comportamiento, pues el Área Bajo la Curva (ABC), es mayor al 75%. Además, la variación entre las dos muestras aleatorias de cada

método, varían muy poco, lo cual indica que al elegir de manera aleatoria los movimientos en masa para la muestra de entrenamiento, no afecta en los resultados (Figura 4.30).

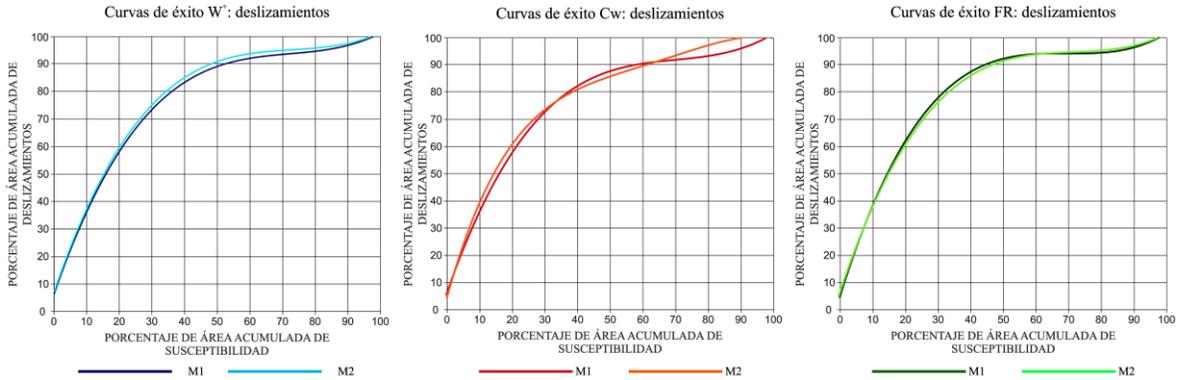


Figura 4.30. Comparación de las curvas de éxito de cada modelo con su respectiva muestra aleatoria de deslizamientos.

A continuación, se muestran las curvas y los mapas de susceptibilidad de cada modelo.

4.4.1. Modelo W^+

Para este modelo el área bajo la curva de la muestra uno fue de 77.4%. En la figura 4.31A, se puede observar que en un área de 31% del área de estudio se encuentran acumulados el 75% de todos los deslizamientos, por lo que se clasificó como susceptibilidad alta; también se observa que en 21% del área de estudio se encuentra acumulado el 15% de deslizamientos, esto se clasificó como susceptibilidad media; y finalmente, como susceptibilidad baja se designó el 48% del área de estudio con el 10% de deslizamientos.

En cuanto a la muestra aleatoria dos, el ABC fue de 78.7%. En esta muestra la categoría de susceptibilidad alta, consiste en 30% del área de estudio con el 75% de los deslizamientos; un 15% de los deslizamientos en un área de 19%, se clasificó como susceptibilidad media; y, la susceptibilidad baja, con un 10% de deslizamientos en un área total acumulada de 51% (Fig. 4.31B).

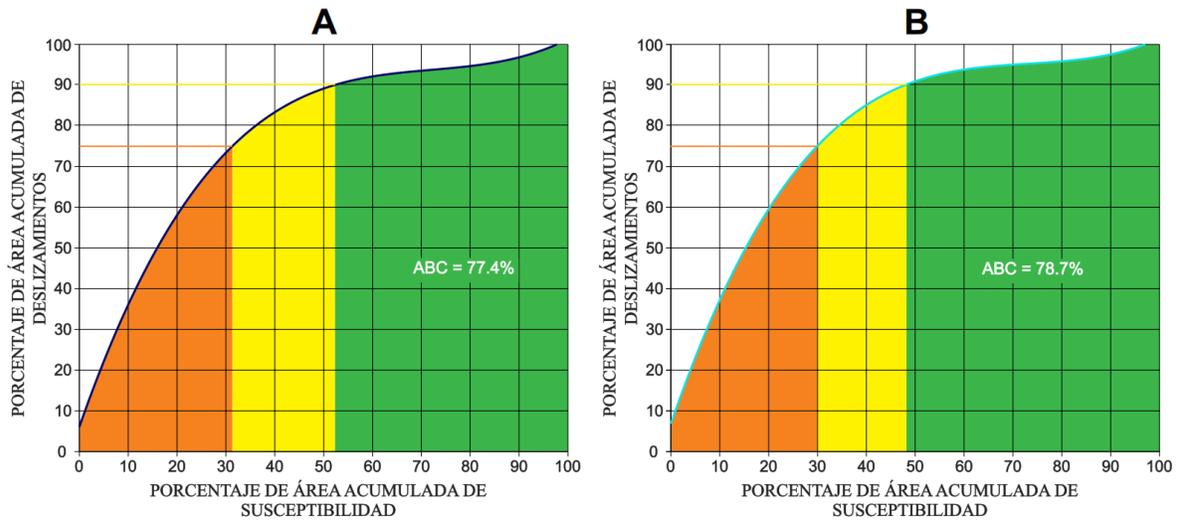


Figura 4.31. Curvas de éxito del modelo pesos de evidencia con los valores de W^+ . A) Curva de muestra uno de deslizamientos. B) Curva de muestra dos de deslizamientos.

En la figura 4.32 se muestran los mapas de susceptibilidad de cada muestra aleatoria con los valores de W^+ .

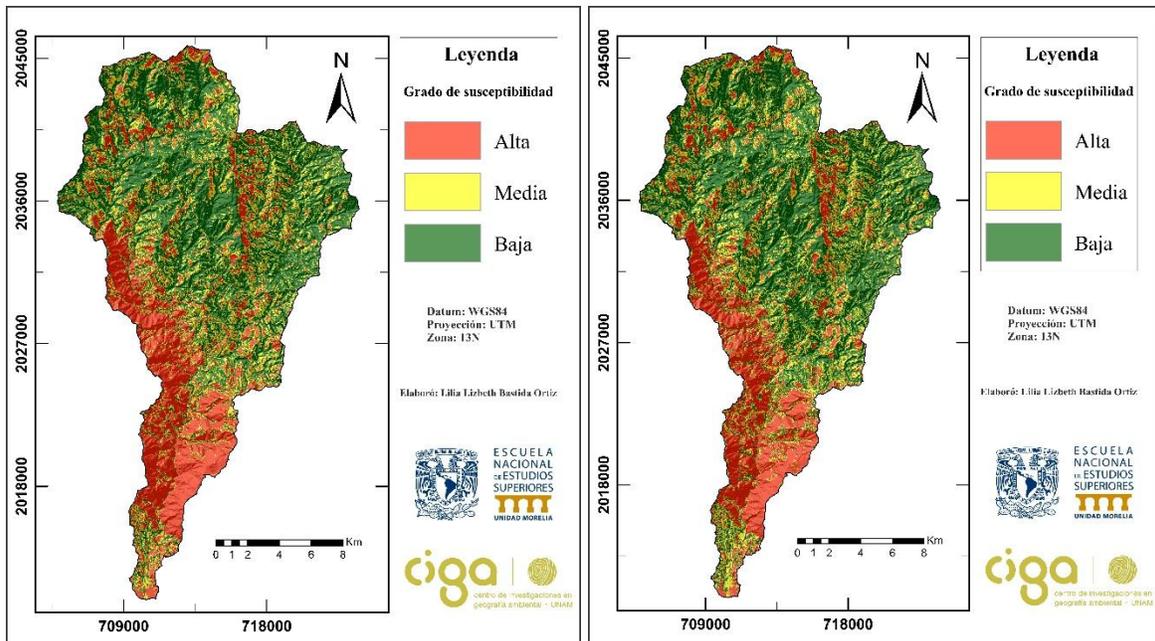


Figura 4.32. Mapas de susceptibilidad por deslizamientos, utilizando el método bivariado WofE (valor de W^+). A la izquierda se muestra el mapa de la muestra aleatoria uno, y a la derecha el mapa de la muestra aleatoria dos.

4.4.2 Modelo Cw

Aplicando los valores de Cw, para la muestra uno, se obtuvo un área bajo la curva de 76.5%. En esta muestra la categoría de susceptibilidad alta consiste en 32% del área de estudio con el 75% de los deslizamientos; un 15% de los deslizamientos en un área de 26% se clasificó como susceptibilidad media; y, la susceptibilidad baja, con un 10% de deslizamientos en un área total acumulada de 42% (Fig. 33A).

El ABC de la muestra dos fue de 77.7%. Como se puede apreciar en la figura 4.33B, en el 31% del área de estudio, aproximadamente, se encuentran acumulados el 75% de todos los deslizamientos presentes en el área de estudio, lo cual se clasificó como susceptibilidad alta; también se observa que en 30%, aproximadamente, del área de estudio se encuentra acumulado el 15% de deslizamientos, esto se clasificó como susceptibilidad media; y finalmente, como susceptibilidad baja se designó el 39% del área de estudio con el 10% de deslizamientos.

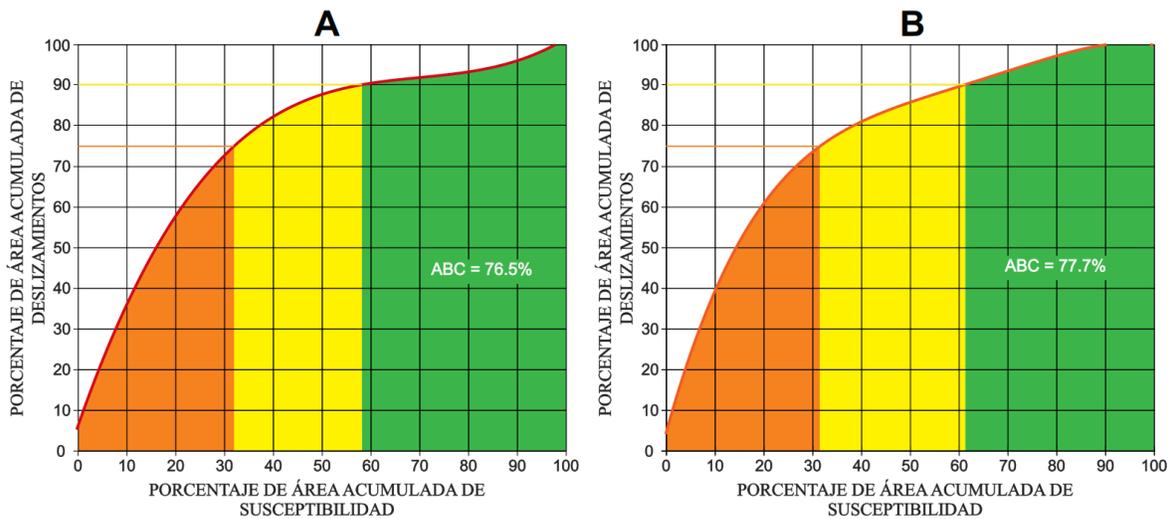


Figura 4.33. Curvas de éxito del modelo pesos de evidencia con los valores de Cw. A) Curva de muestra uno de deslizamientos. B) Curva de muestra dos de deslizamientos.

En la figura 4.34 se muestran los mapas de susceptibilidad de cada muestra aleatoria con los valores de Cw.

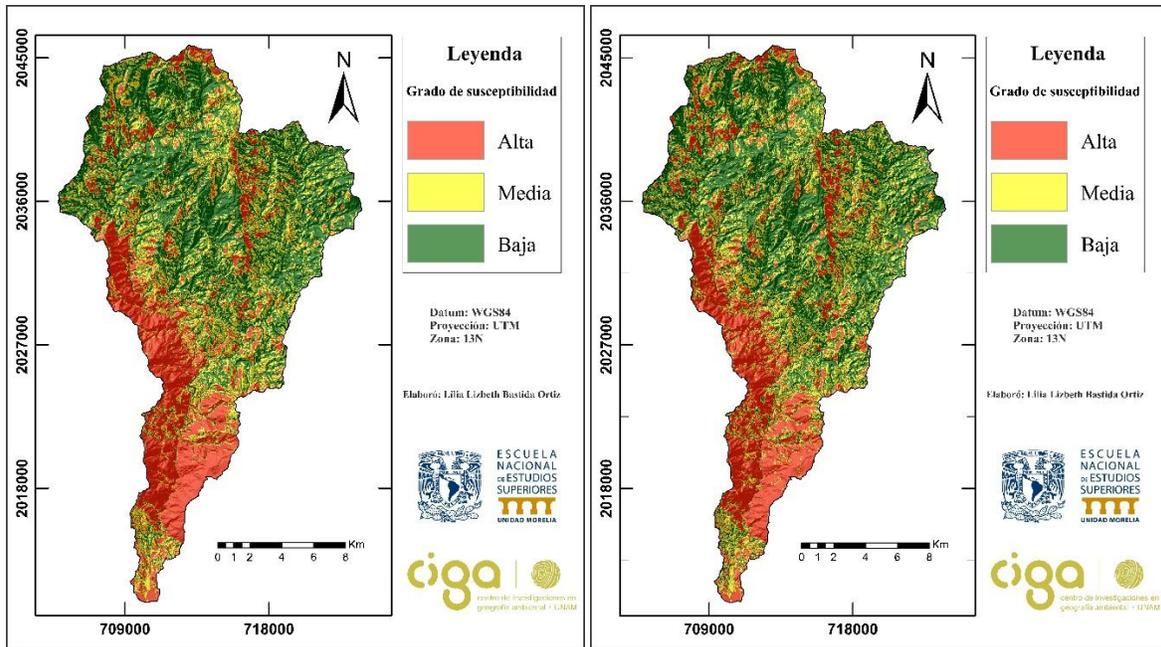


Figura 4.34. Mapas de susceptibilidad por deslizamientos, utilizando el método bivariado WofE (valor de C_w). A la izquierda se muestra el mapa de la muestra aleatoria uno, y a la derecha el mapa de la muestra aleatoria dos.

4.4.3 Modelo FR

A partir del modelo de FR, para la muestra aleatoria uno se obtuvo un área bajo la curva de 79.3%. Las categorías de susceptibilidad se asignaron de la siguiente manera: en un área de 28%, aproximadamente, se encuentran acumulados el 75% de todos los deslizamientos presentes en el área de estudio, por lo que se clasificó como susceptibilidad alta; en 16% del área se encuentra acumulado el 15% de deslizamientos, esto se clasificó como susceptibilidad media; y finalmente, como susceptibilidad baja se designó el 56% del área con el 10% de deslizamientos (Figura 4.35A).

Para la muestra dos, el ABC fue de 79%. En esta muestra la categoría de susceptibilidad alta consiste en 29.5% de área con el 75% de los deslizamientos; un 15% de los deslizamientos en un área de 18% se clasificó como susceptibilidad media; y, la susceptibilidad baja, con un 10% de deslizamientos en un área total acumulada de 52.5% (Fig. 4.35B).

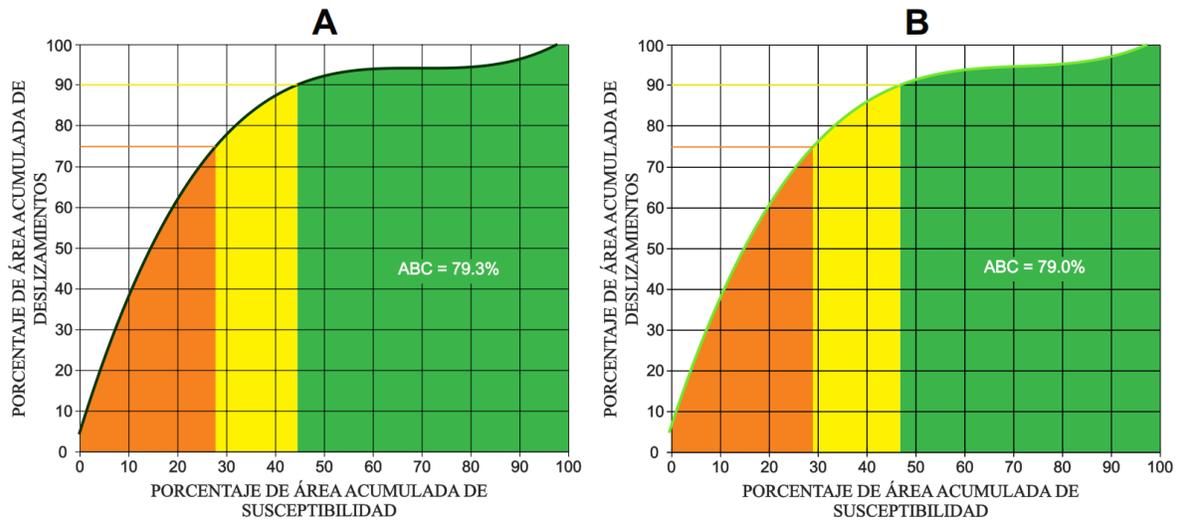


Figura 4.35. Curvas de éxito del modelo FR. A) Curva de muestra uno de deslizamientos. B) Curva de muestra dos de deslizamientos.

En la figura 4.36 se muestran los mapas de susceptibilidad de cada muestra aleatoria con los valores de FR.

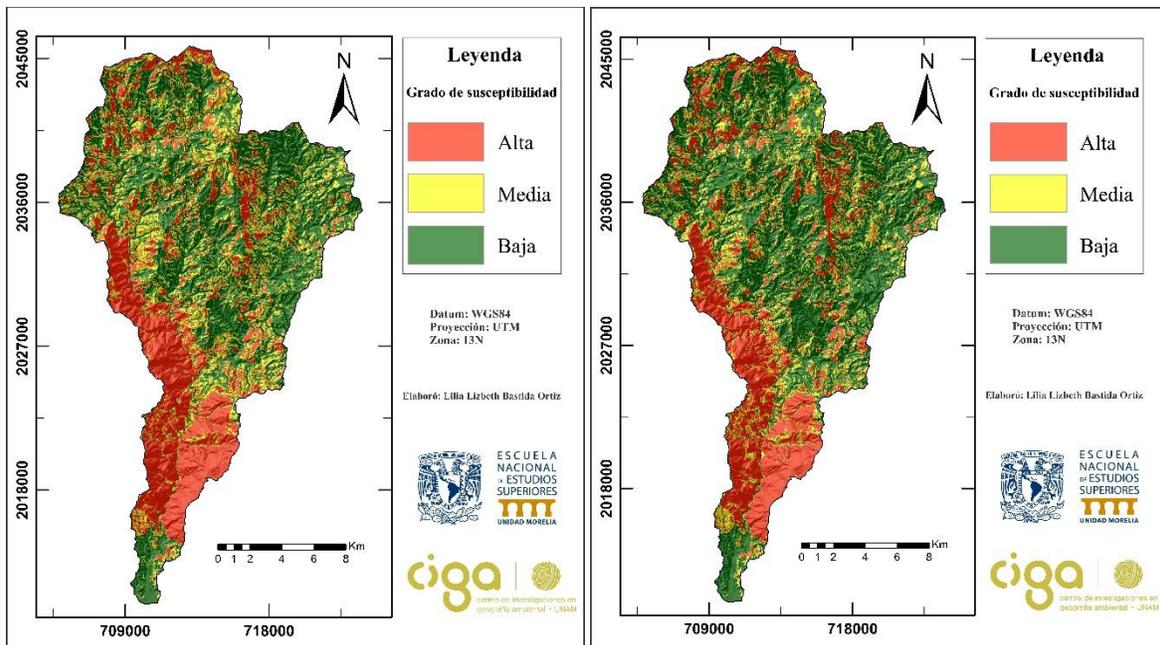


Figura 4.36. Mapas de susceptibilidad por deslizamientos, utilizando el método bivariado FR. A la izquierda se muestra el mapa de la muestra aleatoria uno, y a la derecha el mapa de la muestra aleatoria dos.

En la Tabla 4.4 se muestra un resumen de los rangos de valores de LSI correspondientes a cada grado de susceptibilidad para cada modelo en ambas muestras de deslizamientos.

Tabla 4.4. Rangos de valores de LSI para cada grado de susceptibilidad en deslizamientos.

Susceptibilidad	Rangos de LSI					
	W+		Cw		FR	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Alta	6522 a 136.66	5923 a 276.82	8228 a - 332.43	7662 a - 245.08	20561 a 10706.52	19570 a 10958.9
Media	136.65 a - 912.45	276.81 a - 889.10	-332.44 a -	-245.09 a - 2045.92	10706.51 a 9324.43	10958.8 a 9610.1
Baja	-912.44 a -6430	-889.11 a -6307	-883.11 a - 8459	-2045.93 a -8393	9324.42 a 4205	9610 a 4329

*Los valores de LSI están en unidades adimensionales.

4.5. Modelos de susceptibilidad por movimientos en masa tipo flujos

Al igual que en los movimientos tipo deslizamiento, para los flujos, el análisis de susceptibilidad se realizó con ayuda del software ArcMap y se obtuvieron los valores de W⁺, Cw y FR (Tablas 4.5 y 4.6).

Tabla 4.5. Valores obtenidos para la muestra aleatoria uno, de movimientos en masa tipo flujos.

Factor	Clases	Número de píxeles en la clase	Número de flujos en la clase	W ⁺	W ⁻	Cw	FR
Geología	Brecha andesítica	581783	38	-0.23	0.51	-0.74	0.79
	Caliza	139010	25	0.78	-0.30	1.08	2.18
	Granitoide	29532	0	0.00	0.04	-0.04	0.00
	Aluvión	7077	0	0.00	0.01	-0.01	0.00
	Arenisca	6612	0	0.00	0.01	-0.01	0.00
Suelo	Luvisol-fina	302717	14	-0.58	0.25	-0.83	0.56
	Luvisol-media	229220	11	-0.54	0.16	-0.71	0.58
	Regosol-media	205305	37	0.78	-0.57	1.35	2.19
	Phaeozem-media	13850	1	-0.13	0.00	-0.14	0.88
	Leptosol-media	6811	0	0.00	0.01	-0.01	0.00
	Fluvisol-gruesa	6028	0	0.00	0.01	-0.01	0.00
	Arenosol-gruesa	89	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Uso de suelo	Bosque de Pino	202749	8	-0.74	0.17	-0.91	0.48
	Bosque de Pino fase arbustiva	171583	11	-0.25	0.06	-0.31	0.78
	Selva mediana subcaducifolia fase arbustiva	115557	23	0.88	-0.29	1.17	2.41
	Bosque de Pino fase arbórea	85704	5	-0.35	0.04	-0.38	0.71
	Selva mediana subcaducifolia fase arbórea	43308	1	-1.27	0.04	-1.32	0.28
	Bosque de Pino- Encino fase arbustiva	40592	9	0.99	-0.10	1.09	2.69
	Bosque de Pino- Encino	40322	2	-0.51	0.02	-0.53	0.60
	Selva mediana subcaducifolia	38133	3	-0.05	0.00	-0.05	0.95
	Zona de cultivo	13687	0	0.00	0.02	-0.02	0.00
	Selva baja caducifolia fase arbustiva	12383	1	-0.02	0.00	-0.02	0.98
	Cuerpo de agua	2	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	Pendiente	<10°	52632	3	-0.37	0.02	-0.39
10° - 20°		143860	3	-1.37	0.16	-1.53	0.25
20° - 30°		271475	11	-0.71	0.25	-0.96	0.49
30° - 40°		244266	29	0.36	-0.23	0.60	1.44
40° - 50°		50637	15	1.28	-0.20	1.48	3.59
>50°		1182	2	3.02	-0.03	3.05	20.52

Tabla 4.5 (continuación)

Factor	Clases	Número de píxeles en la clase	Número de flujos en la clase	W ⁺	W ⁻	Cw	FR
Orientación	Plano (-1°)	154	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	N (337°-360°,0°-22°)	57935	1	-1.56	0.06	-1.63	0.21
	NE (22°-67°)	66929	4	-0.32	0.03	-0.35	0.72
	E (67°-112°)	107422	9	0.02	0.00	0.02	1.02
	SE (112°-157°)	103808	17	0.69	-0.17	0.85	1.99
	S (157°-202°)	118915	5	-0.67	0.09	-0.76	0.51
	SO (202°-247°)	111059	15	0.49	-0.11	0.61	1.64
	O (247°-292°)	113928	8	-0.16	0.03	-0.19	0.85
NO (292°-337°)	83902	4	-0.55	0.05	-0.60	0.58	
Curvatura	Cóncava (-7.6 - -0.0001)	380217	27	-0.15	0.13	-0.28	0.86
	Plana (-0.0001 - 0.0001)	66	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	Convexa (>0.0001)	383769	36	0.13	-0.15	0.28	1.14
Relieve relativo	<50m	8066	0	0.00	0.01	-0.01	0.00
	50m - 100m	85031	4	-0.56	0.05	-0.61	0.57
	100m - 200m	555383	37	-0.21	0.41	-0.63	0.81
	200m - 300m	114102	22	0.85	-0.27	1.12	2.34
	>300m	1470	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Distancia a ríos	<25m	98477	5	-0.48	0.06	-0.54	0.62
	25m - 50m	79865	0	0.00	0.11	-0.11	0.00
	50m - 100m	162464	15	0.11	-0.03	0.15	1.12
	100m - 250m	300788	29	0.16	-0.12	0.27	1.17
	>250m	122426	14	0.33	-0.08	0.40	1.39
Distancia a vías	<20m	34279	13	1.53	-0.19	1.71	4.60
	20m - 40m	18163	5	1.21	-0.06	1.26	3.34
	40m - 100m	57866	6	0.23	-0.02	0.25	1.26
	100m - 350m	192943	10	-0.46	0.12	-0.58	0.63
	>350m	460769	29	-0.27	0.31	-0.58	0.76
Distancia a lineamientos	<25m	39139	2	-0.48	0.02	-0.50	0.62
	25m - 75m	72370	12	0.70	-0.11	0.81	2.01
	75m - 150m	110738	9	-0.01	0.00	-0.02	0.99
	150m - 350m	261211	13	-0.50	0.19	-0.69	0.60
	>350m	280562	27	0.15	-0.10	0.26	1.17

Tabla 4.6. Valores obtenidos para la muestra aleatoria dos, de movimientos en masa tipo flujos.

Factor	Clases	Número de píxeles en la clase	Número de flujos en la clase	W ⁺	W ⁻	Cw	FR	
Geología	Brecha andesítica	581783	36	-0.29	0.59	-0.87	0.75	
	Caliza	139010	27	0.86	-0.36	1.22	2.36	
	Granitoide	29532	0	0.00	0.04	-0.04	0.00	
	Aluvi3n	7077	0	0.00	0.01	-0.01	0.00	
	Arenisca	6612	0	0.00	0.01	-0.01	0.00	
Suelo	Luvisol-fina	302717	14	-0.58	0.25	-0.83	0.56	
	Luvisol-media	229220	11	-0.54	0.16	-0.71	0.58	
	Regosol-media	205305	38	0.81	-0.61	1.42	2.24	
	Phaeozem-media	13850	0	0.00	0.02	-0.02	0.00	
	Leptosol-media	6811	0	0.00	0.01	-0.01	0.00	
	Fluvisol-gruesa	6028	0	0.00	0.01	-0.01	0.00	
	Arenosol-gruesa	89	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
Uso de suelo	Bosque de Pino	202749	8	-0.74	0.17	-0.91	0.48	
	Bosque de Pino fase arbustiva	171583	11	-0.25	0.06	-0.31	0.78	
	Selva mediana subcaducifolia fase arbustiva	115557	23	0.88	-0.29	1.17	2.41	
	Bosque de Pino fase arb3rea	85704	5	-0.35	0.04	-0.38	0.71	
	Selva mediana subcaducifolia fase arb3rea	43308	1	-1.27	0.04	-1.32	0.28	
	Bosque de Pino- Encino fase arbustiva	40592	8	0.87	-0.08	0.95	2.39	
	Bosque de Pino- Encino	40322	2	-0.51	0.02	-0.53	0.60	
	Selva mediana subcaducifolia	38133	5	0.46	-0.03	0.50	1.59	
	Zona de cultivo	13687	0	0.00	0.02	-0.02	0.00	
	Selva baja caducifolia fase arbustiva	12383	0	0.00	0.02	-0.02	0.00	
	Cuerpo de agua	2	0	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Pendiente	<10°	52632	2	-0.77	0.04	-0.81	0.46
		10° - 20°	143860	5	-0.86	0.13	-0.99	0.42
20° - 30°		271475	11	-0.71	0.25	-0.96	0.49	
30° - 40°		244266	28	0.33	-0.20	0.53	1.39	
40° - 50°		50637	16	1.34	-0.22	1.57	3.83	
>50°		1182	1	2.33	-0.01	2.34	10.26	

Tabla 4.6 (continuación).

Factor	Clases	Número de píxeles en la clase	Número de flujos en la clase	W ⁺	W ⁻	Cw	FR
Orientación	Plano (-1°)	154	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	N (337°-360°,0°-22°)	57935	1	-1.56	0.06	-1.63	0.21
	NE (22°-67°)	66929	3	-0.61	0.04	-0.65	0.54
	E (67°-112°)	107422	8	-0.10	0.02	-0.12	0.90
	SE (112°-157°)	103808	17	0.69	-0.17	0.85	1.99
	S (157°-202°)	118915	6	-0.49	0.07	-0.56	0.61
	SO (202°-247°)	111059	16	0.56	-0.14	0.69	1.75
	O (247°-292°)	113928	7	-0.29	0.04	-0.34	0.75
NO (292°-337°)	83902	5	-0.32	0.03	-0.36	0.72	
Curvatura	Cóncava (-7.6 - -0.0001)	380217	25	-0.23	0.18	-0.41	0.80
	Plana (-0.0001 - 0.0001)	66	0	0.00	0.00	0.00	0.00
	Convexa (>0.0001)	383769	38	0.18	-0.23	0.41	1.20
Relieve relativo	<50m	8066	0	0.00	0.01	-0.01	0.00
	50m - 100m	85031	4	-0.56	0.05	-0.61	0.57
	100m - 200m	555383	38	-0.19	0.37	-0.56	0.83
	200m - 300m	114102	21	0.80	-0.24	1.05	2.23
	>300m	1470	0	0.00	0.00	0.00	0.00
Distancia a ríos	<25m	98477	7	-0.15	0.02	-0.17	0.86
	25m - 50m	79865	0	0.00	0.11	-0.11	0.00
	50m - 100m	162464	18	0.30	-0.10	0.39	1.34
	100m - 250m	300788	24	-0.03	0.02	-0.05	0.97
	>250m	122426	14	0.33	-0.08	0.40	1.39
Distancia a vías	<20m	34279	13	1.53	-0.19	1.71	4.60
	20m - 40m	18163	3	0.69	-0.02	0.72	2.00
	40m - 100m	57866	7	0.38	-0.04	0.42	1.47
	100m - 350m	192943	9	-0.57	0.14	-0.71	0.57
	>350m	460769	31	-0.20	0.25	-0.45	0.82
Distancia a lineamientos	<25m	39139	2	-0.48	0.02	-0.50	0.62
	25m - 75m	72370	11	0.61	-0.09	0.70	1.84
	75m - 150m	110738	11	0.19	-0.04	0.22	1.20
	150m - 350m	261211	14	-0.43	0.17	-0.60	0.65
	>350m	280562	25	0.08	-0.05	0.13	1.08

Con los valores de las tablas 4.5 y 4.6, se hicieron los cálculos del LSI y posteriormente se generaron las curvas de éxito de las dos muestras aleatorias.

En general, las curvas presentan un buen comportamiento, pues las ABC son mayores al 80% y el cambio es mínimo entre las muestras aleatorias; esto indica que, elegir de manera

aleatoria los movimientos en masa para la muestra de entrenamiento, no afecta en los resultados (Figura 4.37).

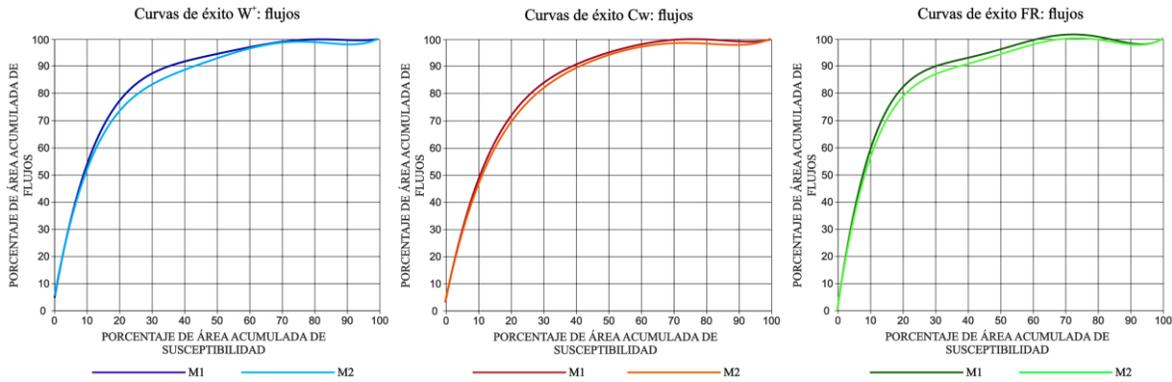


Figura 4.37. Comparación de las curvas de éxito de cada modelo con su respectiva muestra aleatoria de flujos.

A continuación, se muestran las curvas con las categorías de susceptibilidad y los mapas de susceptibilidad de cada modelo.

4.5.1 Modelo W^+

Para este modelo el área bajo la curva de la muestra uno fue de 85.9%. En la Figura 4.38A se puede observar que en un área de 19%, aproximadamente, se encuentran acumulados el 75% de todos los flujos presentes en el área de estudio, por lo que se clasificó como susceptibilidad alta; también se observa que en 16% del área de estudio se encuentra acumulado el 15% de flujos, esto se clasificó como susceptibilidad media; y finalmente, como susceptibilidad baja se designó el 65%, aproximadamente, del área de estudio con el 10% de flujos.

En cuanto a la muestra aleatoria dos, el ABC fue de 84.1%. En esta muestra, la categoría de susceptibilidad alta consiste en 20.5%, aproximadamente, de área con el 75% de los flujos; un 15% de los flujos en un área de 21.5%, aproximadamente, se clasificó como susceptibilidad media; y, la susceptibilidad baja, con un 10% de flujos en un área total acumulada de 58% (Fig. 4.38B).

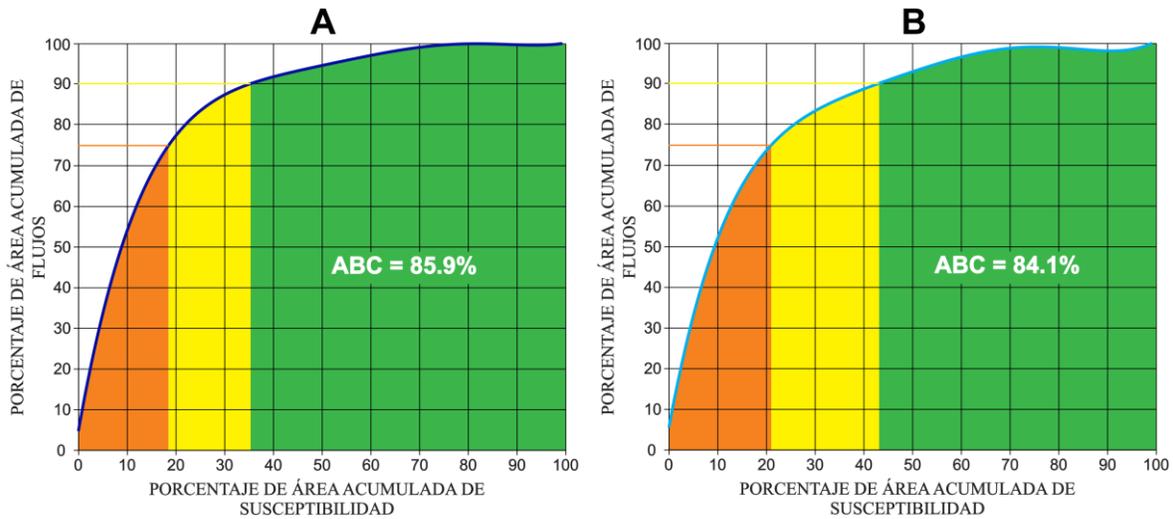


Figura 4.38. Curvas de éxito del modelo pesos de evidencia con los valores de W^+ . A) Curva de muestra uno de flujos. B) Curva de muestra dos de flujos.

En la figura 4.39 se muestran los mapas de susceptibilidad de cada muestra aleatoria con los valores de W^+ .

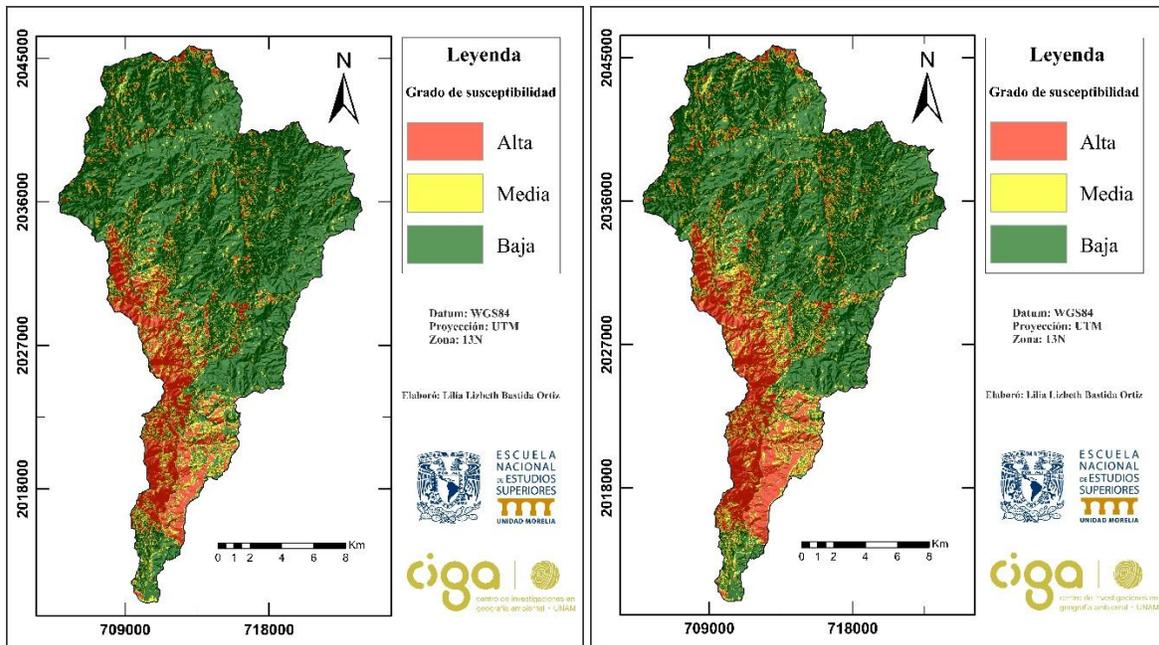


Figura 4.39. Mapas de susceptibilidad por flujos, utilizando el método bivariado WofE (valor de W^+). A la izquierda se muestra el mapa de la muestra aleatoria uno, y a la derecha el mapa de la muestra aleatoria dos.

4.5.2 Modelo Cw

Aplicando los valores de Cw, para la muestra uno, se obtuvo un área bajo la curva de 84.7%. En esta muestra la categoría de susceptibilidad alta consiste en 21.5% del área de estudio con el 75% de los flujos; un 15% de los flujos en un área de estudio de 18%, aproximadamente, se clasificó como susceptibilidad media; y, la susceptibilidad baja, con un 10% de flujos en un área total acumulada de 60.5% (Fig. 4.40A).

El ABC de la muestra dos, fue de 83.4%. Como se puede apreciar en la figura 4.40B, en un área de estudio del 23%, aproximadamente, se encuentran acumulados el 75% de todos los flujos presentes en la zona de estudio, lo cual se clasificó como susceptibilidad alta; también se observa que en 17.5%, aproximadamente, del área se encuentra acumulado el 15% de flujos, esto se clasificó como susceptibilidad media; y finalmente, como susceptibilidad baja se designó el 59.5% del área de estudio con el 10% de flujos.

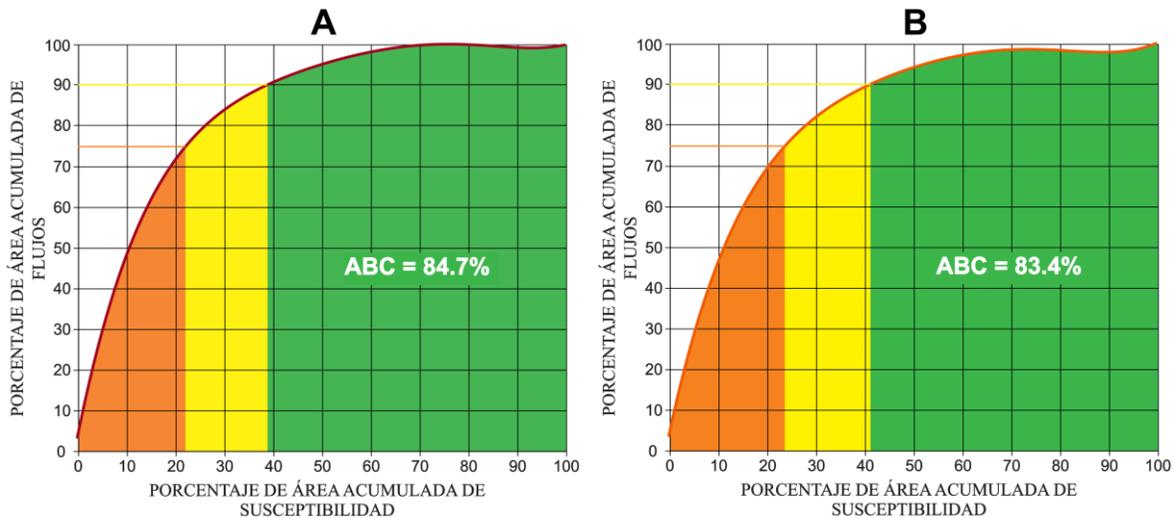


Figura 4.40. Curvas de éxito del modelo pesos de evidencia con los valores de Cw. A) Curva de muestra uno de flujos. B) Curva de muestra dos de flujos.

En la figura 4.41 se muestran los mapas de susceptibilidad de cada muestra aleatoria con los valores de Cw.

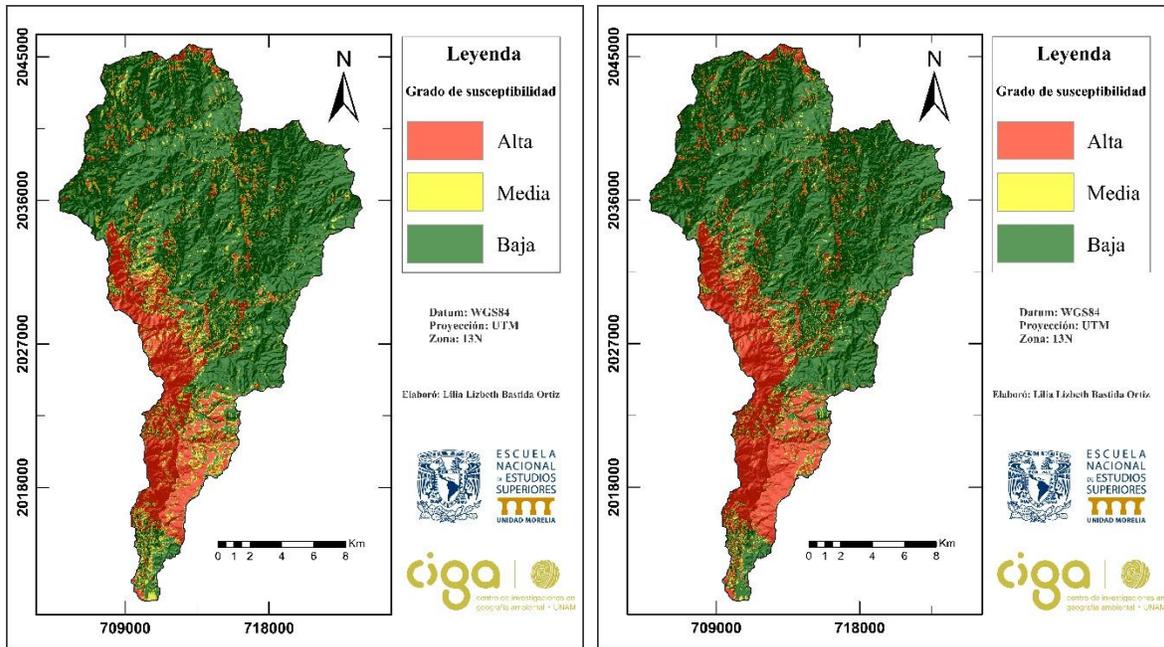


Figura 4.41. Mapas de susceptibilidad por flujos, utilizando el método bivariado WofE (valor de C_w). A la izquierda se muestra el mapa de la muestra aleatoria uno, y a la derecha el mapa de la muestra aleatoria dos.

4.5.3 Modelo FR

A partir del modelo de FR, para la muestra aleatoria uno se obtuvo un área bajo la curva de 88.1%. Las categorías de susceptibilidad se asignaron de la siguiente manera: en un área de 15.5%, aproximadamente, se encuentran acumulados el 75% de todos los flujos presentes en la zona de estudio, por lo que se clasificó como susceptibilidad alta; en 15% del área de estudio se encuentra acumulado el 15% de flujos, esto se clasificó como susceptibilidad media; y finalmente, como susceptibilidad baja se designó el 69.5% del área de estudio con el 10% de flujos (Figura 4.42A).

Para la muestra dos, el ABC fue de 86.2%. En esta muestra la categoría de susceptibilidad alta consiste en 18%, aproximadamente, del área de estudio con el 75% de los flujos; un 15% de los flujos en un área de 20%, aproximadamente, se clasificó como susceptibilidad media; y, la susceptibilidad baja, con un 10% de flujos en un área total acumulada de 62% (Fig. 4.42B).

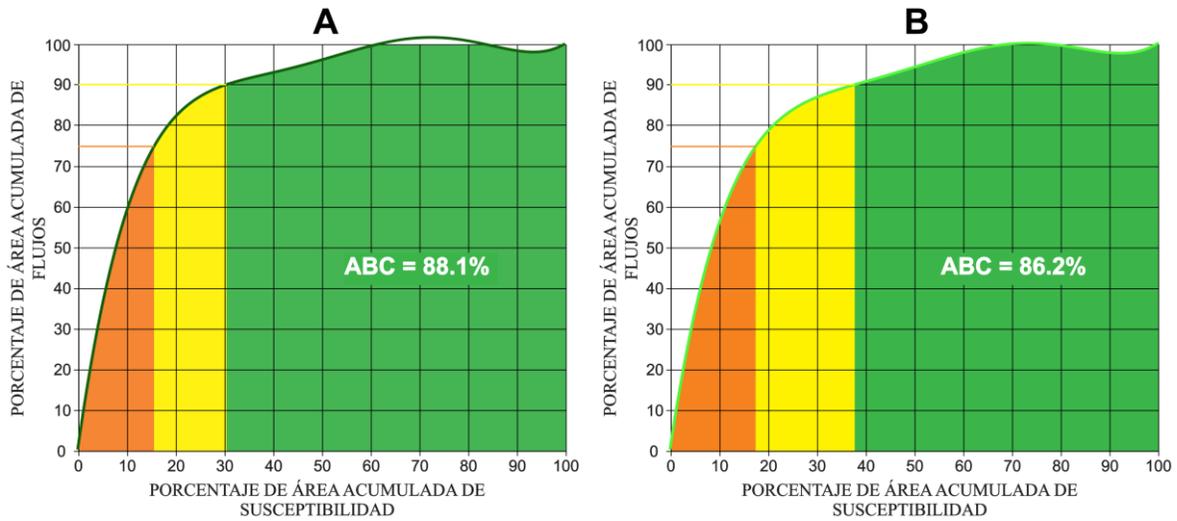


Figura 4.42. Curvas de éxito del modelo FR. A) Curva de muestra uno de flujos. B) Curva de muestra dos de flujos.

En la figura 4.43 se muestran los mapas de susceptibilidad de cada muestra aleatoria con los valores de FR.

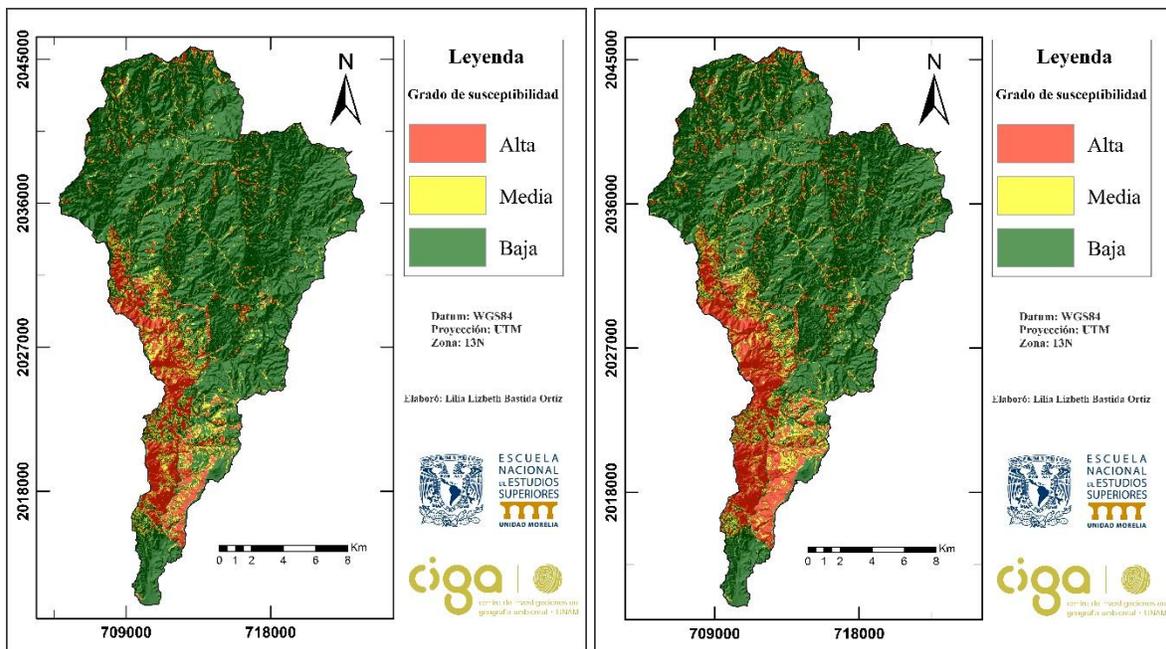


Figura 4.43. Mapas de susceptibilidad por flujos, utilizando el método bivariado FR. A la izquierda se muestra el mapa de la muestra aleatoria uno, y a la derecha el mapa de la muestra aleatoria dos.

En la Tabla 4.7 se muestra un resumen de los rangos de valores de LSI correspondientes a cada grado de susceptibilidad para cada modelo en ambas muestras de flujos.

Tabla 4.7. Rangos de valores de LSI para cada grado de susceptibilidad en flujos.

Susceptibilidad	Rangos de LSI					
	W+		Cw		FR	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Alta	7164 a 841.9	7085 a 564.06	9252 a 286.1	9207 a -150.6	35891 a 12991.04	25905 a 12523.32
Media	841.8 a -329.3	564.05 a -692.7	286.09 a -1011.35	-150.58 a -1018.71	12991.03 a 11761.06	12523.31 a 11182.25
Baja	-329.4 a -7150	-692.69 a -6465	-1011.36 a -8644	-1018.70 a -8008	11761.05 a 2994	11182.24 a 2683

*Los valores de LSI están en unidades adimensionales.

4.6 Validación de modelos de susceptibilidad

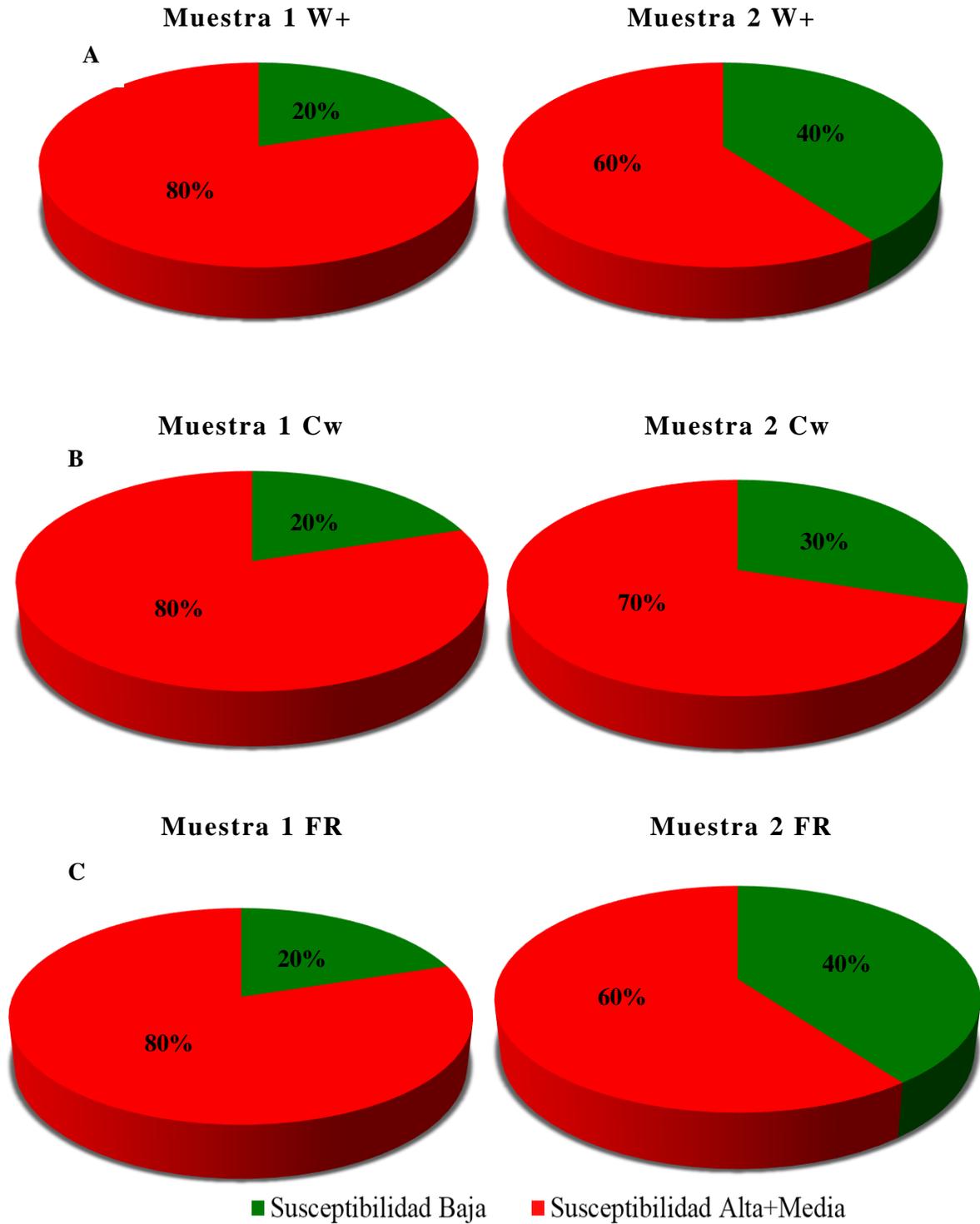
Como se describe en el apartado 3.3.6, la validación de los modelos estadísticos se realizó con el 20% de la muestra del total de deslizamientos, lo cual corresponde a diez deslizamientos, y con el 20% de la muestra del total de flujos, corresponde a quince flujos (ver Tablas 4.8 y 4.9).

Para el grado de predicción de los modelos, se consideró la suma de los movimientos dentro de susceptibilidad alta y media (gráficos 4.2 y 4.3).

Tabla 4.8. Validación de modelos de las muestras aleatorias de deslizamientos.

Susceptibilidad	Número de deslizamientos					
	W+		Cw		FR	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Alta	6	5	5	6	6	5
Media	2	1	3	1	2	1
Baja	2	4	2	3	2	4

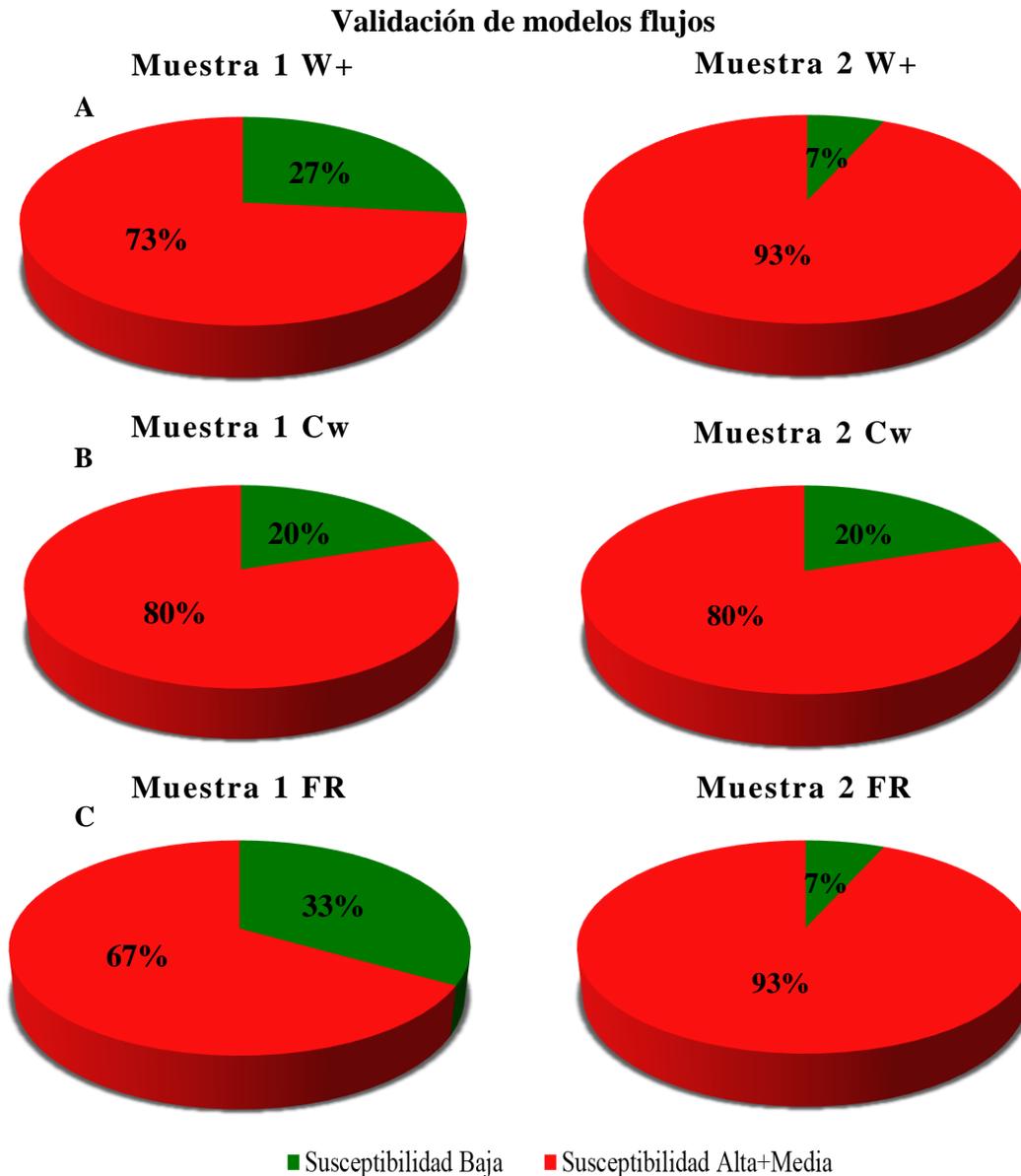
Validación de modelos deslizamientos



Gráficos 4.2. Validación de modelos de deslizamientos. A) W+, B) Cw y C) FR. Se observa que cuando se suman los deslizamientos que cayeron en las categorías de susceptibilidad alta y media, para las muestras el grado de predicción es mayor al 60%.

Tabla 4.9. Validación de modelos de las muestras aleatorias de flujos.

Susceptibilidad	Número de flujos					
	W+		Cw		FR	
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 1	Muestra 2
Alta	10	11	11	11	8	12
Media	1	3	1	1	2	2
Baja	4	1	3	3	5	1



Gráficos 4.3. Validación de modelos de flujos. A) W+, B) Cw y C) FR. Se observa que cuando se suman los flujos que cayeron en las categorías de susceptibilidad alta y media, para las muestras el grado de predicción es mayor al 60%.

DISCUSIONES

En la cuenca Huahua se realizó un inventario de movimientos en masa, donde predominan los movimientos tipo flujo de detritos y deslizamientos, lo cual coincide con lo que reporta Solís et al. (2019), en la Sierra Costa de Michoacán.

Con este inventario, fueron probados dos métodos estadísticos bivariados de zonificación de amenaza por movimientos en masa tipo deslizamiento y tipo flujo, considerando dos muestras aleatorias para cada mecanismo.

Haciendo una comparación entre las curvas de éxito del modelo W^+ , podemos ver que la variación de una respecto a otra, en cuanto al ABC, es de únicamente 1.3% para deslizamientos y 1.8% para flujos. Esto nos indica que elegir los datos de manera aleatoria no afecta los resultados del modelo de susceptibilidad WofE, con los valores de W^+ .

Por otro lado, aunque la validación de los modelos de W^+ con las muestras de deslizamientos y flujos es bueno, 80% y 60% para los primeros, y 73% y 93% para los segundos; en términos espaciales, los mapas, localmente, no reflejan datos coherentes, principalmente en los mapas de susceptibilidad por deslizamientos (Fig. 4.32), ya que la zona sur de la cuenca es marcada como susceptibilidad alta y media, lo cual esperaríamos que fuera susceptibilidad baja, ya que es una zona mayormente plana, donde difícilmente se desarrolla un movimiento en masa, a no ser que se tratara de un movimiento tipo reptación, que no es el caso de los movimientos en masa encontrados en el área de estudio. En los mapas de susceptibilidad por flujos este fenómeno también se observa, pero es menos evidente porque solo se presentan pequeñas áreas en el mapa (Fig. 4.39).

El fenómeno anterior, podría deberse a que la cuenca presenta una morfología peculiar, ya que corresponde a una cuenca muy estrecha, donde los valores de pendiente aún en la parte sur van hasta 40° , aunque no son los valores típicos, se ven afectados por los resultados del cálculo de W^+ , pues en las pendientes de 30° a 40° el valor es positivo tanto en las muestras de deslizamientos como en las de flujos, lo cual quiere decir que esta clase influye de manera importante en la ocurrencia de los deslizamientos y flujos.

En cuanto a las curvas de éxito del modelo C_w , la variación de los resultados obtenidos, en lo que se refiere al ABC, es de 1.2% entre las muestras de deslizamientos y 1.3% para las

de flujos; esto nos indica que, al igual que el modelo W^+ , los resultados no son afectados por la selección de las muestras de manera aleatoria.

Sin embargo, aunque el ABC, la concentración de los movimientos en masa y la validación: 80% y 70% para las muestras de deslizamientos y 80% para las dos muestras de flujos, arrojan buenos resultados, en términos espaciales, no se refleja lo esperado (localmente). Se considera que está ocurriendo el mismo fenómeno que los modelos de W^+ , debido a que el cálculo de este factor está influenciado por los valores de W^+ . Nuevamente esta anomalía, es más evidente en los modelos de susceptibilidad por deslizamientos.

Para las curvas de éxito del método FR, la variación de ABC respecto a las dos muestras de deslizamientos es de 0.3% y de 1.9% para las de flujos, por lo que no se está reflejando un efecto considerable en los resultados al elegir las muestras aleatoriamente.

Además, este método en las curvas de éxito de ambos mecanismos, en comparación con los otros dos modelos, tiene mayor ABC, concentra de mejor manera los movimientos en masa y, espacialmente, muestra los resultados que se esperaban, pues la parte sur de la cuenca es zonificada como susceptibilidad baja.

Una observación interesante, en cuanto a la validación de las muestras de flujos, es que los modelos agrupan un mayor porcentaje de eventos en la categoría de susceptibilidad alta, por ejemplo, para la muestra dos en el método FR, doce de los quince flujos caen en susceptibilidad alta. Este resultado puede significar que el método FR es el que mejor clasifica las zonas de alta susceptibilidad a la ocurrencia de PRM en el área de estudio.

Haciendo un análisis general, en relación con la susceptibilidad de cada mecanismo, los modelos predicen que en la parte central de la cuenca hay mayor probabilidad de ocurrencia tanto para flujos como para deslizamientos. En donde se diferencia la susceptibilidad de ocurrencia es en la parte norte de la cuenca, ya que, para deslizamientos, en su mayoría, los modelos sugieren áreas de susceptibilidad media y, para flujos, en general, se predice una susceptibilidad baja y una susceptibilidad alta en zonas muy puntuales.

En relación con lo anterior, la zonificación de la susceptibilidad alta en la parte central de la cuenca, se debe a que en esta área se encuentran las categorías con mayor peso calculado por los modelos; y a su vez, esto podría ser consecuencia de que la mayoría de los

movimientos en masa se concentran en la parte central de la cuenca, pues es donde se tuvo la oportunidad de hacer un inventario más detallado en la visita a campo.

La evaluación de estos factores sugiere que la litología, la pendiente, el tipo de suelo, el uso de suelo, la orientación y curvatura de la ladera, la diferencia de relieve, y la distancia a vías y lineamientos son muy importantes para la ocurrencia de deslizamientos y flujos en la cuenca Huahua.

En cuanto a la relación del resultado de los modelos de susceptibilidad y la litología, se observa que las categorías de susceptibilidad alta aparecen principalmente en aquellas zonas donde se localizan las calizas, e incluso para todos los modelos el cambio entre zonas de diferente susceptibilidad ocurre en el contacto litológico. Esto sugiere que las calizas son más susceptibles a la ocurrencia de movimientos en masa, sin embargo, este resultado también podría estar influenciado por la densidad del inventario de PRM en la zona centro-sur de la cuenca Huahua.

Al ser la litología uno de los factores más importantes en la ocurrencia de los movimientos en masa, es importante mencionar que a pesar de que se realizó una revisión detallada de las imágenes de satélite para la interpretación de las unidades geológicas, el acceso restringido a gran parte de la cuenca (75%) limitó realizar un recorrido más exhaustivo, por lo tanto, la verificación de la cuenca es poca. Esto puede provocar sesgos importantes en cuanto al límite de los contactos litológicos y la clasificación de las rocas.

Por otro lado, las estructuras tectónicas potencialmente inferidas (lineamientos) y los modelos de susceptibilidad, guardan una relación espacial interesante, ya que, las categorías de susceptibilidad alta y media y los PRM inventariados se presentan, generalmente, alineados con las principales familias de lineamientos (norte-sur, noroeste-sureste y este-oeste). El análisis de ocurrencia de movimientos en masa en función de la distancia a lineamientos muestra que, la zona más probable para la ocurrencia de flujos es a distancias menores a 75 m y para deslizamientos mayores a 150 m. Estas distancias coinciden con los resultados de Regmi et al. (2010), pues en su trabajo encuentran que en todos los PRM, sin distinguir mecanismos, la distancia que tiene más peso para su ocurrencia es menor a 350 m

Al comparar los métodos W+ y FR, es evidente que los procedimientos para el cálculo de pesos de cada categoría, son muy similares, con la diferencia principal de que para el peso de W+ se aplica una transformación de logaritmo natural. Esta transformación, modifica la distribución de los valores de LSI, lo que ocasiona que de manera espacial tengamos resultados diferenciados, siendo el modelo de predicción de FR, el más acercado a lo esperado.

Los modelos de susceptibilidad obtenidos nos permiten analizar que las afectaciones en la infraestructura vial serían de más del 50%, pues la mayoría de los caminos presentes en la zona se ubican en los grados de susceptibilidad alta y media.

Por otra parte, de las ochenta y cinco localidades que se encuentran en la cuenca Huahua, veinte (representan el 25% del total) se localizan en las categorías de susceptibilidad alta y media que, en términos de población, las personas afectadas serían, aproximadamente, cuatrocientas siete, de las cuales un 86% pertenecen al municipio de Aquila, Michoacán y el resto al municipio de Coalcomán. De las veinte localidades que se encuentran en las categorías de susceptibilidad alta y media, tres presentan un rezago social alto, según datos del Censo de Población y Vivienda 2010, en estas localidades la ocurrencia de un PRM podría tener consecuencias más catastróficas.

Según datos del plan de desarrollo municipal 2015-2018, publicado en el periódico oficial del gobierno constitucional del estado de Michoacán de Ocampo, la actividad agrícola del municipio de Aquila se sostiene en gran parte por técnicas de temporal de riego, dicha actividad podría ser afectada con la ocurrencia de algún PRM. Un ejemplo claro de esto es el deslizamiento ocurrido el 03 de octubre de 2008, pues el depósito del PRM represó el río Huahua cortando el suministro de agua en las comunidades aledañas, afectando los cultivos que necesitaban agua suministrada por el río interrumpido.

Finalmente, la eventualidad de los PRM en la región podría traer efectos catastróficos a las localidades que en los resultados del Censo de Población y Vivienda 2010 fueron categorizadas con rezago social alto o muy alto (ver Fig. 2.15).

CONCLUSIONES

En este estudio se aplicaron análisis estadísticos bivariados para hacer una zonificación de susceptibilidad por movimientos en masa tipo deslizamiento y tipo flujos, considerando diez factores condicionantes.

Así, tenemos que para la ocurrencia de deslizamientos las categorías que más influyen en su ocurrencia son: suelos regosoles, leptosoles y phaeozem; selva mediana subcaducifolia; pendientes de 30° a 50°; distancia a lineamientos mayores a 150 m y orientaciones noreste y noroeste. Mientras que para los flujos son: suelos regosoles; selva mediana subcaducifolia fase arbustiva y bosque de pino-encino fase arbustiva; pendientes de 30° a mayores de 50°; distancia a lineamientos de menores a 75 m y orientaciones sureste y suroeste. Las categorías en común que influyen de manera importante en la ocurrencia de flujos y deslizamientos son: rocas calizas, curvatura de la ladera convexa, relieves relativos de 200 a 300 metros y distancia a vías menores que 40 m. Tomando en cuenta estas categorías, se corrobora que existe una estrecha relación entre la litología y los lineamientos con la ocurrencia de movimientos en masa, pues queda evidenciado con la alineación de los PRM y las familias de lineamientos, así como la concentración de flujos y deslizamientos en las rocas calizas.

En general, los tres métodos elaborados, no muestran una variación significativa en cuanto a la elección de los deslizamientos y los flujos para la muestra de entrenamiento de forma aleatoria, porque la técnica genera resultados consistentes en las estimaciones de W^+ , C_w y FR para cada factor condicionante.

De acuerdo a los valores obtenidos en el ABC de las curvas de éxito, se concluye que los tres métodos son eficientes en la determinación de zonas susceptibles a PRM tipo deslizamiento y tipo flujo. Sin embargo, considerando de manera global los parámetros de: ABC; concentración de movimientos en masa en un menor porcentaje de área; concentración de deslizamientos y flujos en susceptibilidad media y alta en la validación; y la distribución espacial de la susceptibilidad en los mapas, el modelo más acertado y coherente para la zonificación de lugares susceptibles a ocurrencia de movimientos en masa tipo deslizamientos y flujos es el de FR .

En muchos enfoques para el método de WofE del peligro de movimientos en masa o la susceptibilidad en el SIG, el proceso de validación del modelo tiende a depender de los datos de la muestra de entrenamiento de movimientos en masa y los mismos datos de PRM a menudo se utilizan para la verificación (Dahal et al., 2008). Este estudio fue verificado con una muestra del 20% del total de la muestra de cada mecanismo. La predicción es de 80% y 60% para las muestras de deslizamientos; y entre 67% y 93% para flujos, por lo tanto, los modelos generan buenas predicciones.

Es importante aclarar que los resultados muestran una probabilidad espacial, es decir, representan las posibles áreas en las que se podrían generar deslizamientos y flujos; pero no nos dicen cuándo ocurrirán (temporalidad). Por tal motivo, la información generada en este trabajo únicamente se puede utilizar como un importante insumo para hacer una planificación territorial; para poder sugerir obras de mitigación y reducción a la vulnerabilidad de la población, es necesario hacer estudios más detallados, como son los modelos determinísticos.

Aun cuando los resultados de los modelos son muy alentadores, es posible que se requiera un mayor volumen de datos en el inventario de movimientos en masa, para que el análisis tenga una mayor representatividad estadística y en consecuencia las zonificaciones aumenten en precisión.

Además, sería idóneo generar información actualizada del uso de suelo, pues en éste se reflejan actividades antrópicas, como zonas de cultivo y generación de vías, que muchas veces influyen bastante en el desequilibrio del terreno, lo cual propicia con mayor facilidad la ocurrencia de movimientos en masa.

Finalmente, para el área de estudio, el modelo que más refleja lo esperado en cuanto a la susceptibilidad a los movimientos en masa tipo flujo y deslizamiento es el FR.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, A., 2015, El marco regional: Sierra-costa, sistema socio-económico, *en* Tres niveles de análisis en sierra-costa michoacana (insumos para el ordenamiento ecológico), Priego, A.G. y Bocco, G. (eds.): Morelia, Mich., México, UNAM: CIGA, 33-60.
- Aguirre, R., 2015, Nivel Cuencas de los Ríos Nexpa y Huahua, Caracterización Físico-Biótica, Priego, A.G. y Bocco, G. (eds.): Morelia, Mich., México, UNAM: CIGA, 111-128.
- Alanís-Anaya, R. M., Legorreta-Paulín, G., Mas, J. F., y Granados-Ramírez, G. R., 2017, Susceptibility to gravitational processes due to land cover change in the Río Chiquito-Barranca del Muerto subbasin (Pico De Orizaba Volcano, México): *Journal of Mountain Science*, 14(12), 2511-2526.
- Alcántara, I., 2000, Landslides: ¿Deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología: *Investigaciones geográficas*, 41, 7-25.
- Alcántara, I., y Murillo, F. G., 2007, Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional: *Investigaciones geográficas*, 1(66), 47-64.
- Alvarado-Méndez, H., Bastida-Jiménez, R. y Vázquez-Tortoledo, R., 2006, Carta Geológica Minera Playa Azul, E13-B88, escala 1:50,000: Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.
- Aristizábal, E., Martínez, H. y Vélez, J. I., 2010, Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias: *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, físicas y Naturales*, 34(131), 209-227.
- Ayala-Carcedo, F., 2002, Introducción al análisis y gestión de los riesgos: *Riesgos naturales*, 133-146.
- Barbieri, G., Cambuli, P., 2009, The weight of evidence statistical method in landslide susceptibility mapping of the Rio Pardu Valley (Sardinia, Italy), *en* 18th World IMACS and MODSIM Congress, Cairns, Australia: Italia, 18th World IMACS / MODSIM Congress, 2658-2664 pp.
- Bonham-Carter, G. F., 1994, *Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS*: Ottawa, Ontario, Canadá, Pergamon, 398 pp.
- Borja-Baeza, R. C., Esteban-Chávez, O., Marcos-López, J., Peña-Garnica, R. J., y Alcántara-Ayala, I., 2006, Slope instability on pyroclastic deposits: landslide distribution and risk mapping in Zacapoaxtla, Sierra Norte de Puebla, Mexico: *Journal of Mountain Science*, 3(1), 1-19.
- Bustamente, J., y Piñeiro, F., 2006. Inventario físico de los recursos minerales del municipio de Aquila, Michoacán: México, Servicio Geológico Mexicano, Fideicomiso de Fomento Minero, 52 pp.

- Calderón, J., 2011, H. Ayuntamiento constitucional de Coalcomán, Michoacán, Plan de desarrollo municipal 2008 – 2011, *Periódico oficial del gobierno constitucional del estado de Michoacán de Ocampo*, 18 pp.
- Cardozo, C.P., 2013, Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta (Argentina): Cordoba, Argentina, Universidad Nacional de Cordoba, tesis de maestría, 109 pp.
- Carrara, A., 1983, Multivariate models for landslide hazard evaluation: *Mathematical Geology*, 15, 403-426.
- Casagli, N., Catani, F., Puglisi, C., Delmonaco, G., Ermini, L. y Margottini, C., 2004, An Inventory-Based Approach to Landslide Suceptibility Assesment and its Aplication to the Virginio River Basin, Italy: *Enviromental and Engeneering Geoscience*, 10(3), 203-216.
- Centeno-García, E., 1994, Tectonic evolution of the Geurrero Terrane, Western, Mexico: Arizona, University of Arinoza, tesis doctoral,
- Centeno-García, E., Busby, C., Busby, M., Gehrels, G., 2011, Evolution of the Guerrero composite terrane along the Mexican margin, from extensional fringing arc to contractional continental arc: *Geological Society of America*, 123 (9-10), 1776-1797.
- Centeno-García, E., Corona-Chávez, P., Talavera-Mendoza, O. e Irondo, A., 2003, Geologic and tectonic evolution of the western Guerrero Terrane-a transect from Puerto Vallarta to Zihuatanejo, Mexico, *en Geologic transects across Cordilleran Mexico, Guidebook for the field trips of the 99th, Geological Societyof America Cordilleran Section Anual Meeting: Puerto Vallarta, Jalisco, México, Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología*, 201-228.
- Centeno-García, E., Guerrero-Suastegui, M. y Talavera-Mendoza, O., 2008, The Guerrero Composite Terrane of western Mexico: Collision and subsequent rifting in a supra-subduction zone: *The Geological Society of America, Special Paper 436*, 279-308.
- Centeno-García, E., Ruíz, J., Coney, P., Patchett, P., y Ortega-Gutiérrez, F., 1993, Guerrero terrene of Mexico: Its role in the Souther Cordillera from new geochemical data: *Geology*, 21, 419-422.
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP), 2018, Medición de la pobreza multidimensional y Gasto en Ramo 33, Indicadores a nivel municipal, 2010 y 2015: Ciudad de México, Centro de Estudios de las Finanzas Públicas.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), 2016, Impacto Socioeconómico de los Desastres en México durante 2015: Ciudad de México, México, Centro Nacional de Prevención de Desastres y Sistema Nacional de Protección Civil, 1 resumen ejecutivo.

- Clerisi, A., Perego, S., Tellini, C. y Vescovi, P., 2006, A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the conditional Analysis method: the Baganza valley case study (Italian Northern Apennines): *Environmental Geology*, 50(7), 941-961.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2016, Atlas del Agua en México 2016: Ciudad de México, México, CONAGUA, 135pp.
- Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH), 2015, Informe especial sobre los grupos de autodefensa en el estado de Michoacán y las violaciones a los derechos humanos relacionadas con el conflicto: Ciudad de México, CNDH, informe, 377 pp.
- Consejo Nacional de Población (CONAPO), 2000, Índice de marginación por localidad 2000: Ciudad de México, México, CONAPO.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), 2012, Informe de pobreza y evaluación en el estado de Michoacán 2012: México, D.F., CONEVAL, informe, 56 pp.
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL), 2015, Pobreza nivel Municipio 2015, Michoacán (en línea), en coneval.org.mx, base de datos, <
https://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Michoacan/Paginas/pobreza_municipal2015.aspx>, acceso libre, consulta: diciembre 2019.
- Corominas, J., van Westen, C., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J.P., Fotopoulos, S., Catani, F., Van Den Eeckhaut, M., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitolakis, K., Winter, M.G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervás, J. y Smith, J.T., 2013, Recommendation for the quantitative analysis of landslide risk: *Bolletín of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209-263.
- Cortés, P.A. y Grajales, S., 2018, Comparación entre los métodos estadísticos bivariado y multivariado para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa escala 1:10,000, en el municipio de la Estrella-Antioquia: Medellín, Colombia, Universidad EAFIT, tesis de licenciatura, 70 pp.
- Cruden, D. M., y Varnes, D. J., 1996, Landslides: investigation and mitigation, *en* Landslide types and processes: Transportation research board, special report, 247 pp.
- Cruden, D.M., 1991, A simple definition of a landslide: *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43(1), 27-29
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S., Paudyal, P., 2008, Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence: *Geomorphology*, 102(3-4), 496-510.
- DeMets, C., y Traylen, S., 2000, Motion of the Rivera plate since 10 Ma relative to the Pacific and North American plates and the mantle: *Tectonophysics*, 318(1-4), 119-159.

- European Community Programme (EPOCH), 1993, Temporal Occurrence and forecasting of landslides in the European Community, Flageollet, J.C. (ed.): Europa, EPOCH.
- Ferrer, M., 1995, Los movimientos de ladera en España, *en* IGME. (ed), Reducción de riesgos geológicos en España: Madrid, DIRDN, 69-81.
- Ferrusquía, I., Applegate, S.P. y Espinosa, L., 1978, Rocas volcanosedimentarias mesozoicas y huellas de dinosaurios en la región suroccidental pacífica de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2(2), 150-162.
- Gaidzik, K., Ramírez-Herrera, M. T., Bunn, M., Leshchinsky, B. A., Olsen, M., y Regmi, N. R., 2017, Landslide manual and automated inventories, and susceptibility mapping using LIDAR in the forested mountains of Guerrero, Mexico: *Geomatics, natural hazards and risk*, 8(2), 1054-1079.
- Galindo, J.A. y Alcántara, I., 2015, Inestabilidad de laderas e infraestructura vial: análisis de susceptibilidad en la sierra nororiental de Puebla, México: *Investigaciones Geográficas*, 88, 122-145.
- García, E., 1998, Carta de Climas de la República Mexicana escala 1:1,000,000 (Clasificación de Koppen, modificada por García): Ciudad de México, México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CANABIO), 1 mapa.
- García, S., 2017, Susceptibilidad geomorfológica a deslizamientos en arroyos secundarios del sur de la cuenca La Ciénega, volcán Nevado de Toluca: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura, 143 pp.
- Garduño-Monroy, V.H., Corona-Chávez, P., Isarade-Alcántara, I., Mennella, L., Arrygue, E., Bigioggero, B. y Chiesa, S., 1999, Carta Geológica de Michoacán, escala 1:250,000: Morelia, Mich., México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 1 mapa.
- Grajales, M. y López, M., 1984, Estudio petrogenético de las rocas ígneas y metamórficas en el prospecto Tomatlan-Guerrero-Jalisco: Ciudad de México, Instituto Mexicano del Petróleo, reporte técnico, 76 pp.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., Galli, M., 2006, Estimating the quality of landslide susceptibility models: *Geomorphology*, 81, 166–184.
- Hartlen, J. y Viberg, L., 1988, General report: Evaluation of landslide hazard: *Proc. Vth. ISL*, 2, 1037-1057.
- Hernández, V.M., 2005, Caracterización de los procesos de remoción en masa en la región de Zacapoaxtla, Sierra Norte de Puebla, México: Ciudad de México., México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 139 pp.
- Hernández-Madrigal, V.M., Mendoza, M.E., y Garduño-Monroy, V.H., 2010, Susceptibilidad de la Inestabilidad de Laderas: *ResearchGate*, 34-37.

- Hinojosa-Corona, A., Rodríguez-Moreno, V.M., Munguía-Orozco, L., Meillón-Menchaca, O., 2011, El deslizamiento de ladera de noviembre 2007 y generación de una presa natural en el río Grijalva, Chiapas, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 63(1), 15-38.
- Hutchison, J.N, 1988, General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hidrogeology, in Fifth International Symposium on Landslides, Balkema, Róterdam, Países Bajos: Róterdam, Países Bajos, Bonnard, C. (ed.), 3-35
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1984, Carta Geológica Lázaro Cárdenas 1:250,000: Aguascalientes, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1985, Síntesis Geográfica del Estado de Michoacán: Aguascalientes, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 1999, Ortofotos Digital E13B76c, escala 1:20,000: México., Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2006, II Censo General de Población y Vivienda, 2005: Aguascalientes, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Instituto Nacional de Ecología (INE) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2007, Documento Técnico del Mapa de Cuencas Hidrográficas de México, escala 1:250,000: Aguascalientes, Aguascalientes, INEGI, INE y CONAGUA.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2009, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Aquila, Michoacán de Ocampo: Aguascalientes, México, INEGI, prontuario, 9 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2009, Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Coalcomán de Vázquez Pallares, Michoacán de Ocampo: Aguascalientes, México, INEGI, prontuario, 9 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010, Red hidrográfica, escala 1:50,000, edición 2.0: Aguascalientes, Aguascalientes, INEGI, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2011, Inventario Nacional de Fenómenos Geológicos escala 1:250,000: Aguascalientes, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, ed. 1, 1 conjunto vectorial.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2013, Carta edafológica, escala 1:250,000: Aguascalientes, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, serie II, 1 mapa.

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2013, Carta topográficas: E14A..., escala 1:50,000: Aguascalientes, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, serie III, 1 mapa en formato shapefile.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2013, Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, escala 1:250,000: Aguascalientes, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, serie V, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2013, Conjunto de datos vectoriales escala 1:1 000 000. Precipitación media anual: Aguascalientes, Aguascalientes, INEGI, serie I, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2015, Catalogo de Localidades (en línea), en microrregiones.gob.mx, base de datos, <<http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/LocdeMun.aspx?tipo=clave&campo=loc&ent=16&mun=008>>, acceso libre, consulta: noviembre de 2019.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2015, Principales resultados por localidad (ITER) del Censo de Población y Vivienda 2010, Estados Unidos Mexicanos (en línea), en datos.gob.mx, base de datos, <<https://datos.gob.mx/busca/dataset/censo-de-poblacion-y-vivienda-2010-principales-resultados-por-localidad-iter/resource/868c9ab0-40bb-41db-91d0-d7bb1c5065d3>>, acceso libre, consulta: octubre de 2019.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2016, Anuario Estadístico y Geográfico de Michoacán de Ocampo: Aguascalientes, Aguascalientes, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 726 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2017, Anuario estadístico y geográfico de Michoacán de Ocampo: Aguascalientes, México, INEGI, anuario, 726 pp.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2017, Encuesta Intercensal (2015), Censo de Población y Vivienda (2010), Panorama sociodemográfico de Michoacán de Ocampo: Aguascalientes, México, INEGI, 251 pp.
- Jaimes, M., Niño, M., Reinoso, E. y Padilla, R., 2010, Base de datos de deslizamientos inducidos por sismo y lluvia en México para calibrar un modelo de análisis de talud infinito, en Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Acapulco, Gro., México: SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA A.C., 895-901.
- Juárez, J., 2016, H. Ayuntamiento constitucional de Coalcomán, Michoacán, Plan de desarrollo municipal 2015 – 2018, *Periódico oficial del gobierno constitucional del estado de Michoacán de Ocampo*, 24 pp.

- Juárez, J., 2017, H. Ayuntamiento constitucional de Coalcomán, Michoacán, Plan de desarrollo municipal 2015 – 2018, *Periódico oficial del gobierno constitucional del estado de Michoacán de Ocampo*, 26 pp.
- Juárez, J., 2018, H. Ayuntamiento constitucional de Aquila, Michoacán, Modificación parcial del programa de desarrollo urbano del centro de población, *Periódico oficial del gobierno constitucional del estado de Michoacán de Ocampo*, 28 pp.
- Juárez, J., 2018, H. Ayuntamiento constitucional de Coalcomán, Michoacán, Modificación parcial del programa de desarrollo urbano del centro de población, *Periódico oficial del gobierno constitucional del estado de Michoacán de Ocampo*, 28 pp.
- Lee, S. y Pradhan, B., 2007, Landslide hazard mapping at Selangorm Malaysia using frequency ratio and logistic regression models: *Landslides*, 4(1), 33-41.
- Lee, S., Sambath, T., 2006, Landslide susceptibility mapping in the Damrei Romel area, Cambodia using frequency ratio and logistic regression models: *Environmental Geology*, 50(6), 847-855.
- Legorreta, G., Bursik, M., Ramírez-Herrera, T., Lugo, J., Zamorano, J. y Alcántara, I., 2013, Landslide Inventory and Susceptibility Mapping in the Río Chiquito-Barranca Del Muerto Watershed, Pico de Orizaba Volcano, Mexico: *Landslides: Global Risk Preparedness*, 277-287.
- Legorreta, G., Bursik, M., Solene, P., Lugo, J., Paredes, L.M. y Aceves, F., 2014, Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 66(2), 343-354.
- Londoño-Linares, J.P., 2017, Landslides susceptibility assessment using discriminant analysis. Application on a regional scale: *DYNA*, 84(201), 278-289.
- Mammerickx, J., y Klitgord, K.D., 1982, Northern East Pacific Rise: Evolution From 25 m.y. B.P. to the present: *Journal of Geophysical Research*, 87(B8), 6751-6759.
- Martini, M., 2008, Estratigrafía, deformación y magmatismo de la región comprendida entre Huetamo y Zihuatanejo (Michoacán, Guerrero): Implicaciones para la evolución tectónica del sur de México durante el Cretácico y el Terciario temprano: *Juriquilla, Qro., México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral*, 263 pp.
- Medina, C., Troche, C., Larrazábal, A. y Velásquez, A., 2015, El marco regional: Sierra-costa, Vegetación y Uso de Suelo, A.G. y Bocco, G. (eds.): Morelia, Mich., México, UNAM: CIGA, 25-28.
- Meten, M., PrakashBhandary, N., y Yatabe, R., 2015, Effect of Landslide Factor Combinations on the Prediction Accuracy of Landslide Susceptibility Maps in the Blue Nile Gorge of Central Ethiopia, *Geoenvironmental Disasters*, 2(1), 1-17.

- Morales, D., 2018, Evaluación del método multicriterio para la zonificación de deslizamientos: Huehuetla, Puebla y Metztlán, Hidalgo: Ciudad de México, México, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de licenciatura, 157 pp.
- Morán-Zenteno, D.J., Cerca, M., y Keppie, J.D., 2005. La evolución tectónica y magmática cenozoica del suroeste de México: avances y problemas de interpretación. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 57(3), 319-341.
- Morán-Zenteno, D.J., Tolson, G., Martínez-Serrano, R.G., Martiny, B., Schaaf, P., Silva-Romo, G., Macías-Romo, C., Alba-Aldave, L., Hernández-Bernal, M.S. y Solís-Pichardo, G.N., 1999, Tertiary arc-magmatism of the Sierra Madre del Sur, Mexico, And its transition to the volcanic activity of the Trans-Mexican Volcanic Belt: *Journal of South American Earth Sciences*, 12, 513-535.
- Muñiz-Jauregui, J. A., y Hernández-Madrigal, V. M., 2012, Zonificación de procesos de remoción en masa en Puerto Vallarta, Jalisco, mediante combinación de análisis multicriterio y método heurístico: *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 29(1), 103-114.
- Observatorio Sismológico del Suroccidente (OSSO), 2018, México-Inventario Histórico de Desastres (en línea), ver. 10.03.002: Colombia, Corporación OSSO, <https://online.desinventar.org/desinventar/#MEX-1250695136-mexico_inventario_historico_de_desastres>, acceso libre, consulta: 15 de febrero de 2019.
- Ocampo, R. y Garduño, V.H., 2016, La inestabilidad de laderas apoyada por cartografía geológica y estudios de teledetección: *Tlamati Sabiduría*, 7(2), 1-13.
- Ojeda, J., 1996, Elementos conceptuales de las metodologías de zonificación geotécnicas y de amenazas para propósitos de planificación territorial, *en VI Congreso Colombiano de Geotecnia y Erosión*, Bucaramanga, Colombia.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2009, Informe de evaluación global sobre la reducción del riesgo de desastres 2009, Riesgo y pobreza en un clima cambiante: Ginebra, Suiza, Naciones Unidas, 34-38.
- Ortiz, M.A., 2000, Sistema Clasificador del Relieve de México, escala 1:250,000. Instituto Nacional de Ecología de la SEMARNAT e Instituto de Geografía de la UNAM, <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/geologia/infoescala.aspx>.
- Pantoja, A.J. y Estrada, B.S., 1986, Estratigrafía de los alrededores de la mina de hierro de El Encino, Jalisco: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 47(1), 1-15.
- Pardo, M., y Suárez, G., 1995, Shape of the subducted Rivera and Cocos plate in southern Mexico: Seismic and tectonic implications: *Journal of Geophysical Research*, 100 (B7), 12357-12373.

- Paulín, G. L., Bursik, M., Hubp, J. L., Mejía, L. M. P., y Quesada, F. A., 2014, A GIS method for landslide inventory and susceptibility mapping in the Río El Estado watershed, Pico de Orizaba volcano, México: *Natural hazards*, 71(1), 229-241.
- Paulín, G. L., Bursik, M., Hubp, J. L., Mejía, L. M. P., y Quesada, F. A., 2014, A GIS method for landslide inventory and susceptibility mapping in the Río El Estado watershed, Pico de Orizaba volcano, México: *Natural hazards*, 71(1), 229-241.
- Paulin, G. L., Bursik, M., Ramírez-Herrera, M. T., Lugo-Hubp, J., Orozco, J. Z., y Alcántara-Ayala, I., 2013, Landslide Inventory and Susceptibility Mapping in the Río Chiquito-Barranca Del Muerto Watershed, Pico de Orizaba Volcano, Mexico: *Landslides: Global Risk Preparedness*, 277-287.
- Paulin, G. L., Bursik, M., Ramírez-Herrera, M. T., Lugo-Hubp, J., Orozco, J. Z., y Alcántara-Ayala, I., 2013, Landslide Inventory and Susceptibility Mapping in the Río Chiquito-Barranca Del Muerto Watershed, Pico de Orizaba Volcano, Mexico: *Landslides: Global Risk Preparedness*, 277-287.
- Paz, J., González, R., Gómez, M. y Velasco, J., 2017, Metodología para elaborar mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa, análisis del caso ladera sur de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas: *Investigaciones Geográficas*, 1(92), 1-16.
- Pettjohn, F.J., 1949, *Sedimentary Rock*: New York, Harper & Brothers Publishers, 731 pp.
- Priego, A.G. y Bocco, G., 2015, Tres niveles de análisis en sierra-costa michoacana (insumos para el ordenamiento ecológico): Morelia, Mich., México, UNAM: CIGA, 223 pp.
- Priego, A.G., Bocco, G., Rivas, H., Troche, C., y Acosta, A., 2015, El marco regional: Sierra-costa, componentes abióticos del paisaje, *en* Tres niveles de análisis en sierra-costa michoacana (insumos para el ordenamiento ecológico), Priego, A.G. y Bocco, G. (eds.): Morelia, Mich., México, UNAM: CIGA, 17-24.
- Proyecto Multinacional Andino (PMA): Geociencias para las Comunidades Andinas (GCA), 2007, *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas*: Colombia, PMA:GCA, 432 pp.
- Ramírez-Herrera, M.T., Urrutia-Fucugauchi, J., 1999, Morphotectonic zones along the coast of the Pacific continental margin, southern Mexico: *Geomorphology*, 237-250.
- Regmi, N.R., Giardino, J.R., Vitek, J.D., 2010, Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA: *Geomorphology*, 115 (1-2), 172-187.
- Romero-Rojas, W., Ramos-Bernal, R., Vázquez-Jiménez, R., Arrogante-Funes, P. y Arroyo-Matus, R., 2017, Detección de deslizamientos de laderas por el método de regresión lineal utilizando imágenes aster en la zona centro del estado de Guerrero, México, *en* Congreso de la AGE 50 años de congresos de geografía, Madrid, España, 1-10.

- Rosa-Helguera, J., Barrera-Hernández, D., Pérez-Rodríguez, G., Valladolid-Cacho, R., Vázquez-Toledo, R. y Romo-Ramírez, J., 1999, Carta Geológica Minera, Colima E13-3, escala 1:250,000: Guadalajara, Universidad de Guadalajara y Servicio Geológico Mexicano, 1 Mapa.
- Salinas-Jasso, J.A., Salinas-Jasso, R.A., Montalvo-Arrieta, J.C. y Alva-Niño, E., 2017, Inventario de movimientos en masa en el sector sur de la Saliente de Monterrey. Caso de estudio: cañón Santa Rosa, Nuevo León, noreste de México: Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, 34(3), 182-198.
- Santacana, U.N., 2001, Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat: Barcelona, España, Universidad Politécnica de Catalunya, tesis doctoral, 399 pp.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), 2016, Anuario estadístico del sector comunicaciones y transportes 2016: Ciudad de México, SCT, anuario, 239 pp.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 2016, Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2016, Aquila, Michoacán: Ciudad de México, Subsecretaría de Planeación, Evaluación y Desarrollo Regional, informe anual, 2 pp.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 2016, Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2016, Coalcomán de Vázquez Pallares, Michoacán: Ciudad de México, Subsecretaría de Planeación, Evaluación y Desarrollo Regional, informe anual, 2 pp.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 2017, Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2017, Aquila, Michoacán: Ciudad de México, Subsecretaría de Planeación, Evaluación y Desarrollo Regional, informe anual, 3 pp.
- Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL), 2017, Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social 2017, Coalcomán de Vázquez Pallares, Michoacán: Ciudad de México, Subsecretaría de Planeación, Evaluación y Desarrollo Regional, informe anual, 3 pp.
- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Cambio Climático (SEMARNAC), 2016, Ordenamiento Ecológico para el estado de Michoacán: Morelia, Michoacán, Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente, estudio técnico, 158 pp.
- Servicio Geológico Colombiano, 2013, Documento metodológico de la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000: Bogotá, D. C., Colombia, Servicio Geológico Colombiano, 136 pp.
- Servicio Geológico Colombiano, 2017, Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000: Bogotá, D. C., Colombia, Servicio Geológico Colombiano, 218 pp.

- Servicio Geológico Mexicano, 2002, Carta Geológica-Minera Lázaro Cárdenas E13-6-9, escala 1:250,000: Pachuca, Hidalgo, Servicio Geológico Mexicano, 1 mapa.
- Servicio Geológico Mexicano, 2017, El microscopio petrográfico: Ciudad de México, Servicio Geológico Mexicano, Actualización: 22/03/2017, <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Informacion_complementaria/El-microscopio-petrografico.html>, acceso público, consulta: 20 de febrero de 2019.
- Soeters, R. y van Wester, C., 1996, Slope stability recognition, analysis, and Zonation: Application of Geographical Information Systems to landslide hazard zonation, in Tumer, A. and Schuster, R. (eds.), Landslides: Investigation and Mitigation: Washington, DC, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, 129-177
- Solís-Castillo, B., Mendonza, M.E., Vázquez, G. y Bocco, G., 2019, Landslide inventory map of the tropical dry Sierra Costa Region, Michoacan, Mexico: Physical Geography, 1-24.
- Suárez, J., 2009, Deslizamientos: Colombia, U. Industrial de Santander, 588 pp.
- van Westen, C.J., 1994, GIS in landslide hazard zonation: a review, with examples from the Andes of Colombia: Mountain environments y geographic information systems, 135-176.
- van Westen, C.J., 2002, Use of weights of evidence modeling for landslide susceptibility mapping: Paises Bajos, international Institute for Geoinformation Science and Earth Observation (ITC), Guía, 21pp.
- van Westen, C.J., 2013, Guidelines for the generation of 1:50.000 scale landslide inventory, susceptibility maps, and qualitative risk maps, illustrated with case studies of the provinces Thanh Hoa and Nghe An: Universidad de Twente, Facultad de Ciencias de Geoinformación y Observación de la Tierra, 61 pp.
- van Westen, C.J., Castellano, E. y Kuriakose, S.L., 2008, Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An over-view: Engineering Geology 102(3-4), 112-131.
- Varnes, D.J., 1978, Slope movements, types and processes, in Landslides: Analysis and control, Schuster, R.L. y Krizek, R.J. (eds.): Washington, 11-33.
- Velasco de León, P., Arellano-Gil, J., Ortiz-Martínez, E.L., Lozano-Carmona, D.E., Domínguez-Trejo, I., Canales-García, I. y Carbot-Chanona, G., 2016, Paleontología y geología de la Sierra Madre del Sur: Biodiversidad de la sierra madre del sur, UNAM, 67-90.
- Vidal-Serratos, R., 1986, Tectónica de la región de Zihuatanejo, Guerrero, Sierra Madre del Sur: Ciudad de México, México, Instituto Politécnico Nacional, Bachelor tesis, 155 p.

Vidal-Serratos, R., 1991, El miembro Posquelite de la Formación Zihuatanejo, evidencia estratigráfica de un sustrato continental para el arco Albiano de Zihuatanejo, Estado de Guerrero, *en* Convención sobre la evolución geológica de México, Primer Congreso Mexicano de Mineralogía, Pachuca: México, memorias, 228–229.

ANEXO 1. MOVIMIENTOS EN MASA

1. Clasificación

De acuerdo con Cruden (1991), el término movimientos en masa incluye todos aquellos movimientos ladera debajo de una masa de roca, de detritos o de suelo por efectos de la gravedad (Cruden, 1991).

La mayoría de las clasificaciones de movimientos en masa en la literatura científica se basan en: el tipo de material, los mecanismos de movimiento, el grado de deformación del material y el grado de saturación (Proyecto Multinacional Andino (PMA): Geociencias para las Comunidades Andinas (GCA), 2007). La clasificación de la European Community Programme (EPOCH, 1993), derivada de la propuesta de Varnes (1978) y Hutchinson (1988), es una de las más simples y completas, considerando el mecanismo y material involucrado de los movimientos en masa (Cardozo, 2013; Alcántara, 2000) (Tabla 1.1).

Tabla 1.1. Clasificación de movimientos en masa de acuerdo con el EPOCH, 1993.

Mecanismos del movimiento	Tipo de material involucrado		
	Roca	Detritos	Suelo
Caída o desprendimiento	Caída o desprendimiento de rocas	Caída o desprendimiento de detritos	Caída o desprendimiento de suelos
Vuelco o desplome	Vuelco o desplome de rocas	Vuelco o desplome de detritos	Vuelco o desplome de suelos
Deslizamiento rotacional simple	Individual	Individual	Individual
	Múltiple	Múltiple	Múltiple
	Sucesivo	Sucesivo	Sucesivo
Deslizamiento traslacional	Deslizamiento de roca en bloque	Deslizamiento de detritos en bloque	Deslizamiento traslacional de suelos

Continuación de Tabla 1.1.

Mecanismos del movimiento	Tipo de material involucrado		
	Roca	Detritos	Suelo
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de detritos	Coladas de barro
Flujos	Flujo de rocas	Corrientes de detritos / Flujos de detritos	Flujos de tierra, arena o suelo
Expansión lateral	Expansiones laterales en rocas	Expansiones laterales en derrubios	Expansiones laterales en suelos
Complejo	Ejemplo: Alud de rocas (avalancha de rocas)	Ejemplo: Flujo deslizante	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras

Otro de los parámetros importantes en los movimientos en masa son las velocidades. En la Tabla 1.2 se presentan las velocidades típicas con la escala de velocidades propuesta por Cruden y Varnes (1996).

Tabla 1.2. Escala de velocidades de los movimientos en masa, Cruden y Varnes (1996).

Clases de velocidad	Descripción	Velocidad típica	Velocidad (mm/s)
7	Extremadamente rápido	5 m/s	5×10^3
6	Muy rápido	3 m/min	5×10^1
5	Rápido	1.8 m/h	5×10^{-1}
4	Moderada	13 m/mes	5×10^{-3}
3	Lenta	1.6 m/año	5×10^{-5}
2	Muy lenta	16 mm/año	5×10^{-7}
1	Extremadamente lenta		

1.1. Caídas

Los desprendimientos o caídas son los movimientos en caída libre de distintos materiales tales como rocas, detritos o suelos (Alcántara, 2000). Cuando el material es desprendido de una ladera, éste cae desplazándose principalmente por el aire pudiendo efectuar golpes, rebotes y rodamientos (Varnes, 1978). De acuerdo con la escala de velocidades de Cruden y Varnes (1996), estos movimientos son de muy rápidos a extremadamente rápidos (velocidades mayores a 5×10^1 mm/s). Varios autores coinciden en que los movimientos tipo caída ocurren en laderas fuertemente inclinadas (Alcántara, 2000; PMA: GCA, 2007).

1.2. Vuelcos

Los vuelcos o desplomes son un movimiento en masa en el cual hay una rotación generalmente hacia delante de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en una superficie inferior. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empuje de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978). Frecuentemente también ocurren en una o más superficies, en materiales que poseen un sistema de discontinuidades preferenciales como diaclasas o superficies columnares (Alcántara, 2000).

1.3. Deslizamientos

De acuerdo con Alcántara (2000): “Los deslizamientos son movimientos laterales debajo de una masa de suelo, detritos o roca, la cual ocurre sobre una superficie reconocible de ruptura. Con frecuencia, la formación de grietas transversales es la primera señal de la ocurrencia de este tipo de movimientos, las cuales se localizan en la zona que ocupará el escarpe principal. La superficie de ruptura define el tipo de deslizamiento...” (Alcántara, 2000).

a) Deslizamientos rotacionales

En los deslizamientos rotacionales la masa se mueve a lo largo de una superficie de falla curva y cóncava o forma de cuchara; muestran una morfología distintiva caracterizada por un escarpe principal pronunciado y una contrapendiente de la superficie de la cabeza del deslizamiento hacia el escarpe principal.

Las velocidades en las que pueden ocurrir estos deslizamientos van de lenta a rápida, menores a 1 m/s (PMA: GCA, 2007).

b) Deslizamientos traslacionales

Según Cruden y Varnes (1996), los deslizamientos traslacionales son aquellos cuya masa se mueve a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada. En general, estos movimientos suelen ser más superficiales que los rotacionales y el desplazamiento ocurre con frecuencia a lo largo de discontinuidades como fallas, diaclasas, planos de estratificación o planos de contacto entre la roca y el suelo residual o transportado que yace sobre ella (Cruden y Varnes, 1996).

La velocidad de los movimientos traslacionales puede variar desde rápida a extremadamente rápida, hasta 5 m/s (PMA: GCA, 2007).

1.4. *Flujos*

Varnes (1978), define a los flujos como un tipo de movimiento que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978). Además, los flujos son movimientos espacialmente continuos, en los que las superficies de cizalla son muy próximas, de poca duración y, por consiguiente, difíciles de observar. El movimiento de los flujos es muy parecido al de un fluido viscoso, razón por la que la distribución de velocidades no es homogénea y origina la formación de lóbulos a partir del predominio del movimiento intergranular (Alcántara, 2000). El dominio del material en el flujo determinará el nombre del mismo.

Es importante establecer la diferencia entre *flujo de detritos* y *avalancha de detritos*. En el caso del flujo de detritos, el movimiento en masa es canalizado en una trayectoria preestablecida o canal. En cambio, una avalancha de detritos puede desplazarse sobre áreas abiertas en laderas de alta pendiente. Por supuesto las avalanchas de detritos con frecuencia encuentran un canal preexistente y se convierten en flujos de detritos (PMA: GCA, 2007).

1.5. *Expansiones laterales*

De acuerdo con el PMA: GCA (2007)., la propagación o expansión lateral es un tipo de movimiento en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material (PMA: GCA, 2007).

“Las expansiones laterales son movimientos resultado de la fracturación y expansión de suelos o masas de roca compactos, debido a la licuefacción del material subyacente, ocurren cuando materiales gruesos, como fragmentos de rocas, grava, etc., están inmersos en una matriz de material mas fino o contienen arcillas...Este tipo de movimientos ocurre principalmente en ambientes lacustres y marinos de poca profundidad...” (Alcántara, 2000).

Estos tipos de movimientos pueden desarrollarse y evidenciar deformación plástica de materiales frágiles bajo el peso de una unidad competente. Algunos autores señalan que hay

una relación continua entre deslizamientos y expansiones laterales, dependiendo de la importancia de la deformación interna (PMA: GCA, 2007); es por esto que Hutchinson (1988), propone incluir las propagaciones laterales en la categoría de deslizamientos complejos.

Existe una distinción importante entre las propagaciones laterales lentas como las que ocurren en estratos rocosos gruesos que sobreyacen a materiales blandos, y las que involucran licuación de materiales sensibles tales como arenas saturadas de densidad relativa baja a media o limos y arcillas sensitivas. En las primeras el estrato competente superior puede fracturarse y separarse en bloques o losas; el material blando inferior fluye hacia las grietas entre los bloques y así el movimiento de estos es extremadamente lento. Las segundas, usualmente inducidas por terremotos, son extremadamente rápidas y peligrosas (PMA: GCA, 2007).

1.6. Deslizamientos complejos

Los movimientos complejos ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo, entre los más importantes cabe destacar los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes. Las avalanchas o aludes de rocas consisten en la movilización a gran distancia de grandes masas de rocas y detritos, las cuales viajan a gran velocidad. Los flujos deslizantes son resultado del colapso repentino y de gran extensión de una masa de material granular o de detritos que viajan a velocidades rápidas o extremadamente rápidas, como resultado de un efecto perturbador (Alcántara, 2000).

2. Causas de los procesos de remoción en masa

En la Tabla 2.1 se muestran las principales causas a las que se deben los movimientos en masa, de acuerdo a Cruden y Varnes (1996).

Otros autores como Regmi et al., 2010; el Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007; Hinojosa-Corona et al., 2011; Aristizábal et al., 2010, indican que las causas por procesos físicos y las causas de origen antrópicos de la Tabla 1.3 son llamados factores detonantes de los movimientos en masa.

Tabla 1.3. Causas de movimientos en masa, Cruden y Varnes (1996).

Causas de índole geológica	Causas por procesos físicos
<ul style="list-style-type: none">) Materiales débiles) Materiales sensibles) Materiales intemperizados) Materiales sujetos a cizallamiento) Materiales con fisuras y diaclasas) Discontinuidades orientadas adversamente (esquistosidad, planos de inclinación)) Discontinuidades estructurales (fallas, discordancias, contactos)) Permeabilidad contrastante) Contraste de materiales con diferente plasticidad 	<ul style="list-style-type: none">) Precipitación intensa) Derretimiento rápido de nieve o hielo) Eventos de precipitación extraordinarios) Actividad sísmica) Erupciones volcánicas) Gelifracción) Expansión e hidratación de arcillas
Causas morfológicas	Causas de origen antrópico
<ul style="list-style-type: none">) Levantamientos tectónicos o volcánicos) Erosión glacial) Erosión fluvial al pie de las laderas) Erosión marina al pie de los acantilados) Erosión glacial al pie de las laderas) Erosión en márgenes laterales) Erosión subterránea) Remoción de la vegetación (por incendios y sequías) 	<ul style="list-style-type: none">) Excavación de laderas o del pie de las laderas) Incremento de peso en las laderas) Disecación de cuerpos de agua (presas)) Deforestación) Irrigación) Actividad minera) Vibraciones artificiales

ANEXO 2. AJUSTE DE DATOS

Enseguida se presentan las ecuaciones de ajuste a los datos que se obtuvieron con ayuda del programa STATGRAPHICS CENTURION XVI.I. La variable X representa el porcentaje acumulado de movimientos en masa y la variable Y representa el porcentaje acumulado de área.

2.1. Muestra 1 deslizamientos

2.1.1. Modelo W^+

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 6.34229 + 3.42856x - 0.0460774x^2 + 0.000212817x^3 \quad \text{Ecuación 1}$$

$R^2 = 99\%$

Para calcular el ABC se integró la ec. 1, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y \, d = \int_c^1 (6.34229 + 3.42856x - 0.0460774x^2 + 0.000212817x^3) \, d$$

$$y = \left(6.34229x + \frac{3.42856x^2}{2} - \frac{0.0460774x^3}{3} + \frac{0.000212817x^4}{4} \right) \Big|_0^{100}$$

$$A = 7738.32 \, u^2, \text{ ésta representa el } 77.38\% \text{ del área total.}$$

2.1.2. Modelo Cw

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 6.28732 + 3.43453x - 0.0473663x^2 + 0.000225446x^3 \quad \text{Ecuación 2}$$

$R^2 = 99\%$

Para calcular el ABC se integró la ec. 2, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y d = \int_0^{100} (6.28732 + 3.43453x - 0.0473663x^2 + 0.000225446x^3) dx$$

$$y = \left(6.28732x + \frac{3.43453x^2}{2} - \frac{0.0473663x^3}{3} + \frac{0.000225446x^4}{4} \right) \Big|_0^{100}$$

$A = 7648.76 \text{ u}^2$, ésta representa el 76.48% del área total.

2.1.3. Modelo FR

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 5.13725 + 3.85124x - 0.0555016x^2 + 0.000266376x^3 \quad \text{Ecuación 3}$$

$R^2 = 99\%$

Para calcular el ABC se integró la ec. 3, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y d = \int_0^{100} (5.13725 + 3.85124x - 0.0555016x^2 + 0.000266376x^3) dx$$

$$y = \left(5.13725x + \frac{3.85124x^2}{2} - \frac{0.0555016x^3}{3} + \frac{0.000266376x^4}{4} \right) \Big|_0^{100}$$

$A = 7928.79 \text{ u}^2$, ésta representa el 79.28% del área total.

2.2. Muestra 2 deslizamientos

2.2.1. Modelo W^+

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 7.11925 + 3.47066x - 0.0464817x^2 + 0.000212029x^3 \quad \text{Ecuación 4}$$

$$R^2 = 99\%$$

Para calcular el ABC se integró la ec. 4, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y \, d = \int_c^1 (7.11925 + 3.47066x - 0.0464817x^2 + 0.000212029x^3) \, d$$

$$y = \left(7.11925x + \frac{3.47066x^2}{2} - \frac{0.0464817x^3}{3} + \frac{0.000212029x^4}{4} \right) \Big|_0^{100}$$

$$A = 7872.05 \, u^2, \text{ ésta representa el } 78.72\% \text{ del área total.}$$

2.2.2. Modelo Cw

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 4.61191 + 4.30814x - 0.0923948x^2 + 0.000960231x^3 - 0.00000371888x^4$$

Ecuación 5

$$R^2 = 99\%$$

Para calcular el ABC se integró la ec. 5, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y d = \int_0^{100} (4.61191 + 4.30814x - 0.0923948x^2 + 0.000960231x^3 - 0.00000371888x^4) dx$$

$$y = \left(4.61191x + \frac{4.30814x^2}{2} - \frac{0.0923948x^3}{3} + \frac{0.000960231x^4}{4} - \frac{0.00000371888x^5}{5} \right) \Big|_0^{100}$$

$A = 7771.63 \text{ u}^2$, ésta representa el 77.71% del área total.

2.2.3. Modelo FR

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 6.70715 + 3.60788x - 0.0499532x^2 + 0.000233596x^3 \quad \text{Ecuación 6}$$

$R^2 = 99\%$

Para calcular el ABC se integró la ec. 6, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y d = \int_0^{100} (6.70715 + 3.60788x - 0.0499532x^2 + 0.000233596x^3) dx$$

$$y = \left(6.70715x + \frac{3.60788x^2}{2} - \frac{0.0499532x^3}{3} + \frac{0.000233596x^4}{4} \right) \Big|_0^{100}$$

$A = 7898.94 \text{ u}^2$, ésta representa el 78.98% del área total.

2.3. Muestra 1 flujos

2.3.1. Modelo W+

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 4.80342 + 6.77761x - 0.218838x^2 + 0.00362065x^3 - 0.000029313x^4 + 0.0000000916618x^5 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$R^2 = 99.6\%$$

Para calcular el ABC se integró la ec. 7, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y \, d = \int_0^{100} (4.80342 + 6.77761x - 0.218838x^2 + 0.00362065x^3 - 0.000029313x^4 + 0.0000000916618x^5) \, dx$$

$$y = \left(4.80342x + \frac{6.77761x^2}{2} - \frac{0.218838x^3}{3} + \frac{0.00362065x^4}{4} - \frac{0.000029313x^5}{5} + \frac{0.0000000916618x^6}{6} \right) \Big|_0^{100}$$

$$A = 8589.60 \, u^2, \text{ ésta representa el } 85.89\% \text{ del área total.}$$

2.3.2. Modelo Cw

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 4.95551 + 5.86229x - 0.172362x^2 + 0.0027982x^3 - 0.00002323x^4 + 0.0000000757505x^5 \quad \text{Ecuación 8}$$

$$R^2 = 99.6\%$$

Para calcular el ABC se integró la ec. 8, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y d = \int_0^{100} (4.95551 + 5.86229x - 0.172362x^2 + 0.0027982x^3 - 0.00002323x^4 + 0.0000000757505x^5) dx$$

$$y = \left(4.95551x + \frac{5.86229x^2}{2} - \frac{0.172362x^3}{3} + \frac{0.0027982x^4}{4} - \frac{0.00002323x^5}{5} + \frac{0.0000000757505x^6}{6} \right) \Big|_0^{100}$$

$A = 8473.08 u^2$, ésta representa el 84.73% del área total.

2.3.2. Modelo FR

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 2.41394 + 8.37826x - 0.319186x^2 + 0.00604587x^3 - 0.0000545462x^4 + 0.00000018608x^5 \quad \text{Ecuación 9}$$

$R^2 = 99.8\%$

Para calcular el ABC se integró la ec. 9, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y d = \int_0^{100} (2.41394 + 8.37826x - 0.319186x^2 + 0.00604587x^3 - 0.0000545462x^4 + 0.00000018608x^5) dx$$

$$y = \left(2.41394x + \frac{8.37826x^2}{2} - \frac{0.319186x^3}{3} + \frac{0.00604587x^4}{4} - \frac{0.0000545462x^5}{5} + \frac{0.00000018608x^6}{6} \right) \Big|_0^{100}$$

$A = 8805.04 u^2$, ésta representa el 88.05% del área total.

2.4. Muestra 2 flujos

2.4.1. Modelo $W+$

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 5.61833 + 6.5053x - 0.222587x^2 + 0.00404057x^3 - 0.0000359699x^4 + 0.000000122673x^5 \quad \text{Ecuación 10}$$

$$R^2 = 99.6\%$$

Para calcular el ABC se integró la ec. 10, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y \, d = \int_0^{100} (5.61833 + 6.5053x - 0.222587x^2 + 0.00404057x^3 - 0.0000359699x^4 + 0.000000122673x^5) \, dx$$

$$y = \left(5.61833x + \frac{6.5053x^2}{2} - \frac{0.222587x^3}{3} + \frac{0.00404057x^4}{4} - \frac{0.0000359699x^5}{5} + \frac{0.000000122673x^6}{6} \right) \Big|_0^{100}$$

$$A = 8412.62 \, u^2, \text{ ésta representa el } 84.12\% \text{ del área total.}$$

2.4.2. Modelo Cw

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 5.30283 + 5.51877x - 0.157953x^2 + 0.00258618x^3 - 0.0000222041x^4 + 0.000000075724x^5 \quad \text{Ecuación 11}$$

$$R^2 = 99.6\%$$

Para calcular el ABC se integró la ec. 11, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y d = \int_0^1 (5.30283 + 5.51877x - 0.157953x^2 + 0.00258618x^3 - 0.0000222041x^4 + 0.000000075724x^5) dx$$

$$y = \left(5.30283x + \frac{5.51877x^2}{2} - \frac{0.157953x^3}{3} + \frac{0.00258618x^4}{4} - \frac{0.0000222041x^5}{5} + \frac{0.000000075724x^6}{6} \right) \Big|_0^{100}$$

$A = 8340.09 u^2$, ésta representa el 83.40% del área total.

2.4.3. Modelo FR

Ecuación de ajuste de datos:

$$y = 2.67593 + 7.82322x - 0.291622x^2 + 0.00549162x^3 - 0.0000495423x^4 + 0.000000169434x^5 \quad \text{Ecuación 12}$$

$R^2 = 99.5\%$

Para calcular el ABC se integró la ec. 12, evaluando la función de 0 a 100:

$$\int y d = \int_0^1 (2.67593 + 7.82322x - 0.291622x^2 + 0.00549162x^3 - 0.0000495423x^4 + 0.000000169434x^5) dx$$

$$y = \left(2.67593x + \frac{7.82322x^2}{2} - \frac{0.291622x^3}{3} + \frac{0.00549162x^4}{4} - \frac{0.0000495423x^5}{5} + \frac{0.000000169434x^6}{6} \right) \Big|_0^{100}$$

$A = 8621.26 u^2$, ésta representa el 86.21% del área total.