



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

**MODELO ESTADÍSTICO ESPACIAL APLICADO AL ANÁLISIS DEL FACTOR
ANTROPOGÉNICO EN LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR
PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA:
EL CASO DEL MUNICIPIO FRANCISCO LEÓN, CHIAPAS**

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

PRESENTA:
JESÚS ARTURO MUÑIZ JAUREGUI

TUTOR:
VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA, UMSNH

COMITÉ TUTOR
MANUEL EDUARDO MENDOZA CANTÚ
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL, UNAM

JUAN CARLOS MORA CHAPARRO
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

MÉXICO, D. F. Agosto 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Primero doy gracias a lo que me hizo ser humano y una persona más que ha aprendido, aprende y está dispuesta a seguir aprendiendo. Por ello doy gracias a Dios, por seguirme dando el Don de la vida y la libertad de decisión. Doy gracias a mis padres Margarita y Arturo por su apoyo y darme las bases para construir lo que soy. A mi esposa, Silvia Guadalupe por su amor, paciencia, consejos y aceptar caminar junto a este loco.

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, en particular al Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), instituciones que me dieron la oportunidad de formación a nivel posgrado y pusieron ante mí, el conocimiento, espacio y los recursos durante mi desarrollo como Doctor en Geografía. Así mismo, agradezco al CONACYT por la beca otorgada, recursos sin los cuales no hubiera sido posible realizar estos estudios. A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por la beca de terminación de tesis.

Agradezco a mi tutor el Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal, por su guía, consejos, enseñanzas y apoyo. A los miembros de mi comité tutor: Dr. Juan Carlos Mora Chaparro por sus enseñanzas y apoyo, sin el cual no se hubieran podido realizar los recorridos de campo, al Dr. Manuel Mendoza Cantú, por sus enseñanzas e interés mostrado en este trabajo.

En particular hago un extenso agradecimiento al Dr. Luis Miguel Morales Manilla por su incalculable apoyo y conocimientos, bases y estructura sobre la cuales se realizó el último capítulo de la tesis.

A mis sinodales, los doctores Víctor Hugo Garduño Monroy y José Luis Macías Vázquez, por su tiempo y atinados comentarios en la revisión de la tesis.

Agradezco al Instituto de Protección Civil para el Manejo Integral de Riesgos de Desastres del Estado de Chiapas por su apoyo en los recorridos de campo, al igual que a los pobladores y representantes del municipio de Francisco León, que nos dieron alojamiento y

su apoyo durante los trabajos en campo. Agradezco al programa ERMEXS (Estación de Recepción México de la constelación Spot) por las imágenes otorgadas.

Agradezco a todas las personas que me han ayudado de diferentes maneras: a mis amigos y compañeros de posgrado, en especial a Nestor y Giovanni por su amistad y consejos, al igual que todos ellos que nos hemos encontrado a lo largo del camino del doctorado, en particular a las valiosas personas que conocí en mi estancia en la Ciudad de México: Gema, David, Laura, Claudia, a doña Elo y don Alberto. A la comunidad del CIGA, a los geógrafos tapatíos y a todas aquellas personas que no señalo, pero me han ayudado a crecer durante esta etapa de preparación.

ÍNDICE TEMÁTICO

	Página
Índice de figuras	III
Índice de tablas	V
Resúmen General	1
Overview.....	2
Introducción General	4
Capítulo I	
IMPACTO DEL FACTOR ANTROPOGÉNICO EN LA OCURRENCIA DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: UNA APROXIMACIÓN TEÓRICA	
	7
Resumen.....	8
Abstract.....	9
Introducción.....	9
EL FACTOR ANTROPOGÉNICO Y EL IMPACTO AL AMBIENTE.....	10
LOS FACTORES ANTROPOGÉNICOS Y SU IMPACTO EN LA INCIDENCIA DE PRM.....	12
Cambio de uso del suelo.....	12
Deforestación.....	12
Expansión de la frontera agrícola.....	18
Expansión de infraestructuras.....	18
Incendios.....	20
Modificación del relieve.....	21
Un fenómeno multifactorial.....	23
DISCUSIÓN.....	25
REFERENCIAS.....	26
Capítulo II	
MARCO FÍSICO-GEOGRÁFICO DEL MUNICIPIO DE FRANCISCO LEÓN, CHIAPAS	
	33
INTRODUCCIÓN.....	34
HIPSOMETRÍA.....	34
GEOLOGÍA.....	35
CLIMATOLOGÍA.....	40
HIDROGRAFÍA.....	42
GEOMORFOLOGÍA.....	43
Inventario de procesos de remoción en masa.....	44
COBERTURA VEGETAL.....	47
REFERENCIAS.....	51
Capítulo III	
MODELO ESTADÍSTICO ESPACIAL PARA EL ANÁLISIS MULTIFACTORIAL DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: EL CASO DEL MUNICIPIO DE FRANCISCO LEÓN, CHIAPAS	
	54
RESUMEN.....	55
ABSTRACT.....	56

	Página
INTRODUCCIÓN.....	57
ANTECEDENTES.....	58
ZONA DE ESTUDIO.....	60
MATERIALES Y MÉTODOS.....	62
RESULTADOS.....	74
Evaluación del método.....	81
DISCUSIÓN.....	83
CONCLUSIONES.....	85
REFERENCIAS.....	86
DISCUSIÓN GENERAL.....	90
REFERENCIAS.....	93
CONCLUSIONES GENERALES.....	96
Anexo.....	97
CLIMOGRAMAS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS CERCANAS A LA ZONA DE ESTUDIO.....	98
ESTADÍSTICOS APLICADOS EN SPASTMO-SL.....	99
CARTOGRAFÍA.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1	Mapa de localización del municipio de Francisco León dentro del Estado de Chiapas. 6
Figura I-1	Esquema-resumen de los factores antropogénicos que inciden en los procesos de remoción en masa y sus principales consecuencias. 13
Figura I-2	Fuerzas sobre la ladera aportadas por la vegetación (Con base en Greenwood <i>et al.</i> , 2004). 17
Figura I-3	Esquema idealizado del efecto en el centro de equilibrio de una ladera al ser modificada su forma original o al ser agregado elementos adicionales a la ladera. El inciso A) muestra la ladera original sin presentar afectaciones y en equilibrio en los esfuerzos cortantes y de resistencia al cortante. En el inciso B) se muestra la ladera con un corte en la base lo que hizo que el centro de equilibrio (punto negro) se trasladara ladera arriba incrementando el esfuerzo cortante. En el inciso C) se muestra la ladera con un corte en la parte superior lo que trasladó el centro de equilibrio a la base de la ladera, disminuyendo el esfuerzo cortante. En el inciso D) se colocó un material en la base de la ladera lo que trasladó el centro de equilibrio ladera abajo disminuyendo el esfuerzo cortante. En el inciso E) se colocó material en la parte alta de la ladera, lo que trasladó en el centro de gravedad ladera arriba, incrementando el esfuerzo cortante. 23
Figura II-1	Mapa hipsométrico del área de estudio y colindantes 35
Figura II-2	Mapa geológico del área de estudio 36
Figura II-3	Columna estratigráfica de las litologías presentes en la zona de estudio. 37
Figura II-4	Imágenes de las unidades litológicas identificadas en campo. A) Te(lu-ar), B) To(lu-ar), C) To(ar-lu), D) Tm(lu-ar), E) Q(-Dvi). 39
Figura II-5	Mapa de distribución de la precipitación que contienen las estaciones meteorológicas usadas para la interpolación. 41
Figura II-6	Climograma correspondiente a la estación 7365 ubicada al Sureste de la zona de estudio (Ver fig. II-5) 42
Figura II-7	Mapa de la hidrografía en el área de estudio 43
Figura II-8	Mapa de geomorfología del área de estudio que agrupa unidades con litología, pendiente y redes de drenaje homogéneas 45
Figura II-9	Imágenes de los tipos de movimientos de procesos de remoción en masa que se presentan en el área de estudio. A) Flujo de detritos, B) Deslizamiento rotacional, C) Deslizamiento traslacional, D) Caída de detritos y bloques 46
Figura II-10	Mapa de cobertura vegetal resultante del procesamiento de las imágenes SPOT 5 (2009-2010) 48
Figura II-11	Imágenes de tipos de coberturas clasificadas. A) Selva, B) Vegetación secundaria, C) Pastizal cultivado abandonado, D) Pastizal cultivado en uso, E) Pastizal escaso, F) Sin vegetación. 49

	Página
Figura III-1 Zona de estudio 61
Figura III-2 Mapa inventario para la zona ampliada del municipio de Francisco León, Chiapas. 64
Figura III-3 Mapa de unidades de paisaje para el análisis espacial de la susceptibilidad de los PRM en el municipio de Francisco León Chiapas 67
Figura III-4 Gráficas y funciones de preferencia para cada relación espacial. El eje de las ordenadas corresponde los valores de probabilidad 79
Figura III-5 Gráficas de la distribución de probabilidad para el caso de Orientación de la ladera. 80
Figura III-6 Mapa de susceptibilidad a PRM con un enfoque de análisis espacial. 81
Figura III-7 Comparación del Mapa de susceptibilidad a PRM resultante y la distribución de los PRM del mapa inventario en puntos 83

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla II-1 Superficie por unidad litológica en el área de estudio	39
Tabla II-2 Proporción de PRM según su movimiento y la superficie afectada	47
Tabla II-3 Proporciones según tipo de cobertura vegetal	50
Tabla II-4 Resultados de la matriz de confusión para evaluar al mapa de cobertura	51
Tabla III-1 Descripción de las etapas metodológicas del modelo SPASTMO-SL	63
Tabla III-2 Distribución y proporciones de superficie y cantidad de PRM por Unidad de Paisaje	66
Tabla III-3 Resultados de la evaluación estadística de relevancia de las relaciones espaciales para el modelo de susceptibilidad	70
Tabla III-4 Relaciones espaciales que resultaron relevantes por unidad de paisaje y pesos asignados	72
Tabla III-5 Tabla resumen de las relaciones espaciales relevantes incorporadas al modelo de susceptibilidad para cada unidad de paisaje	75
Tabla III-6 Proporciones de los grados de susceptibilidad resultado de la modelación	80
Tabla III-7 Comparación de los grados de susceptibilidad y la distribución de los PRM del mapa inventario	82

RESUMEN GENERAL

Las actividades del ser humano son cada vez más agresivas al medio ambiente y su capacidad técnica tiene mayor potencial de cambiar las condiciones naturales. Es común encontrar investigaciones que hacen referencia a cambios antropogénicos que repercuten en el incremento de desastres. Para el caso de los procesos de remoción masa (PRM) aún no es del todo claro cuál es el nivel de impacto del factor antropogénico. Por ello se formularon las preguntas: ¿Qué es el factor antropogénico? ¿Qué alcance tiene el factor antropogénico en la formación de procesos de remoción en masa? ¿Es posible conocer su nivel de relevancia? ¿Se puede medir su relevancia? ¿Tiene la geografía las herramientas suficientes para abordar los factores antropogénicos en el contexto de un fenómeno peligroso, como los PRM?; preguntas que dieron dirección a este trabajo. De esta manera, se planteó el objetivo de evaluar por medio del tratamiento y diseño estadístico-matemático, el grado de influencia del factor antropogénico ante otro tipo de factores causantes de PRM en el municipio de Francisco León, Chiapas. Primero, se realizó una revisión de trabajos publicados determinando que existen tres grupos de impactos antropogénicos que provocan PRM: cambio de uso de suelo, incendios y modificación del relieve, los cuales producen cambios en la hidrología, degradación de suelos y pérdida de las funciones de la vegetación. Segundo, se trabajó con el modelo SPASTMO-SL basado en un método de análisis espacial que por primera vez se usó para la zonificación de la susceptibilidad a PRM, y pensado para evaluar el factor antropogénico. El método modela el arreglo espacial de los valores resultado de la interacción de dos tipos de eventos geográficos, las relaciones espaciales entre factores que condicionan la ruptura de una ladera y la presencia de PRM. El proceso estadístico se aplicó por unidad de paisaje, formadas con criterios lito-estructurales y la existencia o no de cobertura de selva. Los resultados indicaron que la inclinación de la pendiente, la orientación de la ladera y la proximidad a crestas fueron las relaciones espaciales más requeridas para modelar. Proximidad a caminos fue la relación que en mayor número de ocasiones obtuvo la ponderación más alta y sólo fue relevante en unidades de paisaje sin cobertura de selva. Las unidades sin cobertura de selva integraron más variables (18) que las unidades con cobertura de selva (10). Los resultados finales

indican que 11% de la superficie es de susceptibilidad muy alta, el 21% alta, el 31% media y el 32% baja. Se concluye que el factor antropogénico es el factor que produce cambios, degradación, o pérdida de procesos hidrológicos, edafológicos, físicos y biológicos en una ladera, lo que se traduce en el decremento de la resistencia a los esfuerzos cortantes o al aumento del esfuerzo cortante. Así también, SPASTMO-SL ayudó a entender que la relevancia del factor antropogénico, estriba en hacer más complejo el escenario que permite la ocurrencia de PRM, cambiando el nivel de impacto de los factores naturales. Por último, se demostró que la Geografía si tiene las herramientas necesarias para abordar a los procesos de remoción en masa, como el análisis de la distribución de factores en el espacio y la búsqueda de patrones espaciales.

OVERVIEW

Human activities are increasingly aggressive towards the environment, and their technical capacity has a greater potential change natural conditions. It is common to find research that refers to the repercussion of anthropogenic changes in the increase of disasters. In the case of landslides, the level of impact of anthropogenic factors is not yet clear, which is why the following questions were formulated: What is the anthropogenic factor? What is the scope of the anthropogenic factor in landslide formation? Is it possible to ascertain its level of relevance? Is said relevance measurable? Does Geography have the tools to approach anthropogenic factors in the context of dangerous phenomena such as landslides? These questions have established the direction of this work. The proposed objective was to use a statistic-mathematical treatment and design to evaluate the level of influence of the anthropogenic factor versus other factors that cause landslides in the municipality of Francisco Leon in the State of Chiapas. First, a review of works determined that there are three groups of anthropogenic impacts that cause landslides: land use change, vegetation fires, and landform modification, which produces hydrological change, soil degradation and loss of vegetation function on a slope. Later, the SPASTMO-SL model was developed based on a spatial analysis method that was used for the first time in the zoning of landslide

susceptibility intended to evaluate the anthropogenic factor. The method was designed to model the spatial arrangement of the values that resulted from the interaction of two types of geographic events, as from the spatial relations between factors that condition slope rupture and the presence of landslides. The statistical process was applied per landscape unit; these were based on the criteria of lithological structure and the presence or absence of forest land cover. Results indicated that slope inclination and orientation, as well as ridge proximity, were the most required spatial relations in order to model. Proximity to roads was the spatial relation with the highest consideration, and was only relevant in non-forest cover units. Said units integrated more variables (18) than forest cover units (10). The final susceptibility results were that 11% of the surface has a very high rate of susceptibility, 21% high, 31% medium, and 32% low. It is concluded that the anthropogenic factor is the one that produces change, degradation or a loss in hydrological, soil, physical and biological processes on a slope, which in turn means a decrease in resistance to sheer strength, or an increase in sheer strength. Also, SPASTMO-SL helped understand that the relevance of the anthropogenic factor is that it makes the scenario that allows landslide occurrence more complex, changing the level of impact of natural factors. Lastly, it was proven that Geography does have the necessary tools to approach landslides, such as spatial analysis of factor distribution and the search of spatial patterns.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los estudios enfocados a entender y evaluar los procesos de remoción en masa (PRM) son amplios y variados, pero se han centrado únicamente en estudiar las condiciones naturales que permiten que se presente este fenómeno peligroso. En la actualidad las actividades del ser humano han provocado cambios acelerados en las condiciones naturales del paisaje, incrementando la frecuencia de PRM, por lo que es importante conocer las alteraciones producto de los factores antropogénicos, así como su nivel de relevancia en la formación de PRM. Este trabajo de tesis busca dar respuestas a los siguientes cuestionamientos: ¿Qué es el factor antropogénico? ¿Qué alcance tiene el factor antropogénico en la formación de procesos de remoción en masa? ¿Es posible conocer su nivel de relevancia? ¿Se puede medir su relevancia? ¿Tiene la geografía las herramientas para abordar los factores antropogénicos en el contexto de un fenómeno peligroso, como los procesos de remoción en masa? A lo largo de esta investigación se fueron encontrando enfoques para responder a estas preguntas, visiones que ayudaron a ir madurando las primeras nociones de cómo lograr lo planteado, siendo al final la visión geográfica la que brindo mejores respuestas.

El objetivo general de este trabajo fue evaluar por medio del tratamiento y diseño estadístico-matemático, el grado de influencia del factor antropogénico ante otros factores causantes de los procesos de remoción en masa (PRM) en el municipio de Francisco León, Chiapas.

Los objetivos particulares fueron:

- Definir con detalle los factores antrópicos que condicionan la ocurrencia de los procesos de remoción en masa.
- Reconocer los tipos, morfología y estado de actividad de los procesos de remoción en masa que se presentan en el área de estudio.
- Identificar los factores que tienen una manifestación espacial.
- Hacer uso del análisis espacial para modelar los factores que provocan los PRM en el área de estudio.

- Diseñar un modelo estadístico capaz de identificar la susceptibilidad a los PRM para el área de estudio.

Esta investigación ordenó el conocimiento de lo entendido por factor antropogénico, al reunir diferentes discursos de ¿Qué y Cómo es? Se hizo un esfuerzo por colocar el concepto antropogénico en el contexto del estudio de los PRM, dando una visión de cuáles son los factores antropogénicos más relevantes y qué tipo de impactos ocasionan, y que finalmente se verán reflejados en la reducción de la estabilidad en laderas. Esta investigación manifiesta que todavía se pueden desarrollar métodos, además de los tradicionales, para medir la susceptibilidad del terreno a los PRM. Demuestra que el análisis espacial abre más de una posibilidad para conocer cómo interactúan distintos factores y que las diferencias en el terreno son capaces de explicar el comportamiento de tales factores. Pero lo más importante de este trabajo, es que aporta nuevos conocimientos de factores relevantes para la formación de los PRM y el cómo se comportan espacialmente, sin dejar a un lado, que se demostró que factores antropogénicos provocan un cambio en el comportamiento de los factores del medio físico.

El escenario de la investigación fue el municipio de Francisco León, Chiapas (Fig. 1) que se encuentra al Noroeste del Estado de Chiapas. La población del municipio contabilizada durante el censo realizado por el INEGI en el año 2010 fue de 7,000 personas donde predomina la población de origen Zoque. Su principal vía de comunicación es la carretera estatal Tecpatán-Francisco León, que se encuentra a dos horas por carretera de la capital Tuxtla Gutiérrez. Su economía está basada principalmente en actividades ganaderas y en menor medida a la agricultura.

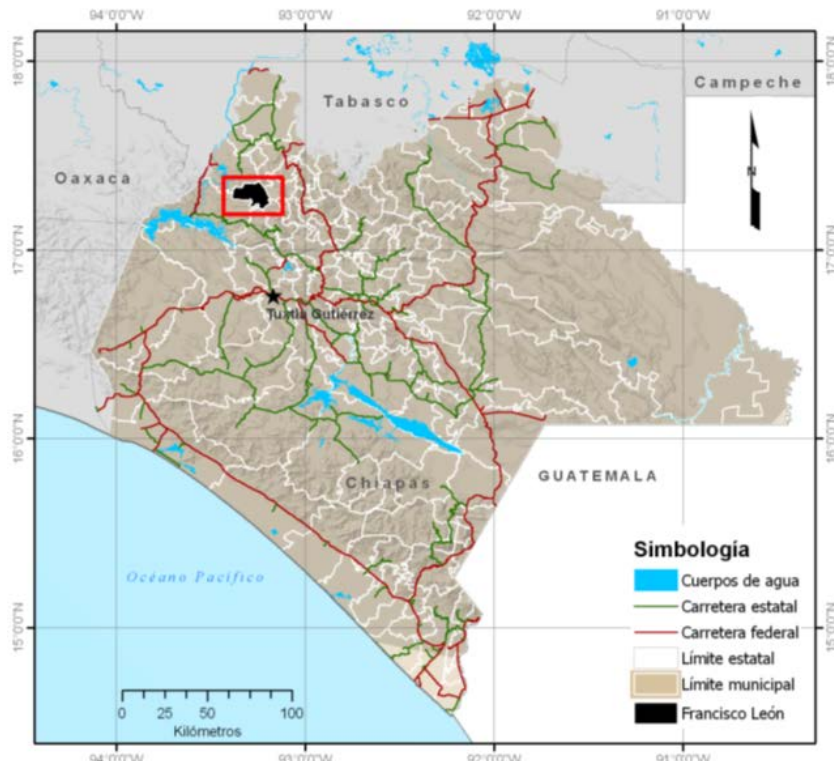


Figura 1. Mapa de localización del municipio de Francisco León dentro del Estado de Chiapas el cual se encuentra destacado con relleno en negro. El recuadro rojo indica la localización de Francisco León.

La estructura del documento se divide en tres capítulos, el primero y el último en formato de artículo y el segundo en formato regular de capítulo de tesis. El capítulo I lleva como título: "Impacto del factor antropogénico en la ocurrencia de procesos de remoción en masa: una aproximación teórica", el capítulo II corresponde al marco físico geográfico y el capítulo III lleva el título de "Modelo estadístico espacial para el análisis multifactorial de los procesos de remoción en masa: el caso del municipio de Francisco León, Chiapas" y finalmente, se cierra con un apartado de discusión y conclusiones generales.

Capítulo I

IMPACTO DEL FACTOR ANTROPOGÉNICO EN LA OCURRENCIA DE

PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA:

UNA APROXIMACIÓN TEÓRICA

IMPACTO DEL FACTOR ANTROPOGÉNICO EN LA OCURRENCIA DE PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: UNA APROXIMACIÓN TEÓRICA

IMPACT OF THE ANTHROPOGENIC FACTOR IN THE OCCURRENCE OF LANDSLIDES: A THEORETICAL APPROACH

JA Muñoz-Jauregui, VM Hernández-Madrigal, ME Mendoza Cantú

(JAMJ) (MEMC) Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta. 58190 Morelia Mich., México. jmuniz@pmip.unam.mx

(VMHM) Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio U, Ciudad Universitaria, 58060 Morelia, Mich., México.

RESUMEN

El impacto provocado por factores antropogénicos es un problema ambiental capaz de alterar las condiciones de estabilidad de unidades morfológicas como las laderas, asociado principalmente a cambios geométricos de la ladera y a la disminución de la resistencia mecánica aportada por la vegetación. El objetivo de este ensayo es determinar y clasificar los factores antropogénicos que condicionan la ocurrencia de los Procesos de Remoción en Masa (PRM). Estos factores son reconocidos en tres principales grupos: cambio de uso del suelo, incendios y modificación del relieve. Cada grupo con influencia en procesos específicos de tipo hidrológico, hidráulico y mecánico. Se plantea como discusión que el factor antropogénico presenta un efecto indirecto y retardado que reduce la estabilidad de laderas y que debe ser considerado como factor preparatorio (activo y dinámico) y en consecuencia contribuye a la formación de PRM.

Palabras clave: Procesos de remoción en masa, factor antropogénico, impacto ambiental

ABSTRACT

The anthropogenic impact has generated an environmental problem through the alteration of stable conditions of geomorphological units such as slopes. The present work represents an effort for deepening in the identification of anthropogenic factors involved in landslides and establishing their impact from the environmental perspective. This impact is mainly associated to changes of slopes geometry and to alteration of the slope stability due to changes in vegetation. Anthropogenic factors may be grouped in three main types: land use change, vegetation fires and modification of landforms. Each of these groups has an impact on landslide occurrence through specific hydrological, hydraulic and mechanic processes. The discussion raised indicates that the anthropogenic factor has an indirect and delayed effect that reduces slope stability and must be regarded as preparatory factor (active, dynamic) and thus contributes to the formation of landslides

Key words: Landslides, anthropogenic factors, environmental impact

INTRODUCCIÓN

El Proceso de Remoción en Masa (PRM) se define como el movimiento ladera abajo de una masa compuesta por rocas, lodos, detritos, o la combinación de estos; producto de la fuerza de gravedad y la pérdida de la resistencia de los materiales que la soportan (Varnes, 1978). Todos los años se presentan afectaciones por este tipo de fenómenos en particular en las zonas tropicales. Los casos más relevantes en México corresponden a los numerosos PRM ocurridos en 1999 y que afectaron a poblados diversos de la Sierra Norte de Puebla (Lugo-Hubp *et al.*, 2005); el desastre ocurrido el 4 de noviembre 2007 en las márgenes del río Grijalva, en el Estado de Chiapas, que causó la muerte de 16 personas y la destrucción de la localidad de Juan de Grijalva (Hernández-Madriral *et al.*, 2011); y más recientemente, los deslizamientos y flujos de detritos que en febrero del 2010 afectaron a municipios del oriente de Michoacán; y en 2013 generaron pérdidas humanas y económicas en la Costa Grande de Guerrero. Todos ellos detonados por precipitaciones excepcionales y con pérdidas económicas incalculables. Los PRM tradicionalmente han sido reconocidos como un fenómeno geológico-meteorológico; sin embargo, ante el incremento de su frecuencia es

claro que otros factores están alterando las condiciones normales de las laderas. Una de las respuestas está en la relación que hay entre zonas siniestradas y el nivel de alteración antrópica que presenta su entorno natural. Por lo que es necesario un mejor entendimiento de los factores antropogénicos que impactan las funciones naturales que dan estabilidad a una ladera, con el objetivo de prevenir futuros desastres. Por lo que este ensayo es un esfuerzo de clasificación y síntesis que permite responder cuáles son los factores antropogénicos que condicionan la ocurrencia de PRM y cuál es su impacto desde la óptica ambiental.

No es nueva la idea de que el hombre es capaz de alterar los procesos naturales. Uno de las primeras publicaciones relacionadas con el impacto de los factores antropogénicos es *Man and Nature* de George Perkins Marsh (1864). En el siglo XX, a partir del simposio *Man's role in changing the face of the earth* realizado en 1956, se retoma a escala mundial la relevancia del impacto humano, sobresaliendo la participación del geógrafo estadounidense Carl O. Sauer. Pero es hasta la década de los setenta cuando se presentan trabajos que refieren sobre afectaciones antropogénicas (Nossin, 1972; Swanson y Dyrness, 1975). Selby (1979) hace referencia de los factores antropogénicos como desencadenantes de PRM en uno de los capítulos del libro *Man and Environmental Processes*. En 1985, Sidle y colaboradores, publican un trabajo cuyo enfoque principal es el manejo del uso del suelo como factor de inestabilidad, enfocándose en el impacto de los incendios forestales, construcción de caminos y asentamientos humanos; la publicación se convirtió en un clásico en el tema. Sidle y Ochiai (2006) publican el que hasta el momento ha sido el último trabajo que trató de manera amplia las afectaciones causadas por los factores antropogénicos a nivel global; enmarcados en el concepto de uso de suelo.

EL FACTOR ANTROPOGÉNICO Y EL IMPACTO AL AMBIENTE

El concepto antropogénico es comúnmente empleado para distinguir todo lo que no es de origen natural, y suele ser usado frecuentemente en estudios de índole ambiental donde antropogénico bien podría ser sinónimo de alteración humana del medio físico. Cuando la palabra “antropogénico” es antecedida por “impacto” (impacto antropogénico), el concepto

se refiere al cambio originado por el ser humano a un medio que se encontraba en estado natural (Von Storch y Stehr, 2006), o bien es la consecuencia de explotar y modificar el ambiente originando un efecto negativo (Lerche y Glaesser, 2006). Desde una perspectiva geomorfológica, Goudie (2010) y Slaymaker *et al.* (2009) conciben al impacto antropogénico como capaz de modificar y acelerar procesos naturales, con la consecuente alteración de ciclos en tiempo y espacio. Un concepto relacionado es el proceso llamado “antropogeomorfológico” (*anthropogeomorphic*) (James y Marcus, 2006; Rivas *et al.* 2006) que considera al hombre como un agente geomorfológico, el cual genera tasas promedios de erosión mayores que las producidas por procesos naturales (Bonachea *et al.*, 2010; Hooke, 2000; Slaymaker, *et al.* 2009). Así pues, el impacto antropogénico es el resultado de la alteración del sistema natural (ciclos y procesos) por el sistema humano-cultural durante la búsqueda de satisfactores como: aire, agua, alimento, refugio, vestido y energía (Lerche y Glaesser, 2006).

Se debe tener en cuenta que desde la perspectiva de la inestabilidad de laderas el nivel de impacto de los factores antropogénicos dependerá de las condiciones físicas del lugar. Por ejemplo, en ecosistemas tropicales donde se combinan fuertes pendiente y altas precipitaciones, los factores antropogénicos incrementan notablemente la susceptibilidad a los PRM (Borgatti y Soldati, 2005; Buccolini *et al.*, 2007; Van Den Eeckhaut *et al.*, 2007; Vanacker y Govers, 2007).

Es importante señalar a qué tipo de cambios nos referimos, en este caso, la clasificación de Turner II *et al.* (1990) ayuda de buena manera a entender esto. La clasificación reconoce dos tipos de cambios ambientales producto de factores antropogénicos: el cambio sistémico y el acumulativo. El cambio sistémico corresponde a impactos en sistemas de funcionamiento global, por ejemplo el subsistema climático. En tanto, el cambio acumulativo afecta al subsistema ecológico (ejs: deforestación, pérdida de biodiversidad, contaminación de agua y suelo), y al subsistema geomorfológico, (ej. erosión). Con base en esta clasificación el impacto, resultado de los factores antropogénicos que inciden en la ocurrencia de PRM, corresponde a un cambio de tipo acumulativo; es decir, se trata de impactos directos al medio ambiente.

LOS FACTORES ANTROPOGÉNICOS Y SU IMPACTO EN LA INCIDENCIA DE PRM

Se identificaron tres principales factores antropogénicos que condicionan la ocurrencia de PRM: cambio de uso del suelo, incendios y modificación del relieve. De cada uno se desprenden procesos de degradación ambiental más específicos que a continuación se detallan:

Cambio de uso del suelo

El uso del suelo es la conexión del ser humano con los ecosistemas terrestres (Braumoh y Vlek, 2008). Se refiere tanto al manejo antropogénico de la superficie (agricultura, ganadería, silvicultura), como a la designación de áreas de usos (uso urbano, conservación), resultado de la organización de una sociedad y de su estructura económica (Goudie, 2006; Liverman y Roman, 2008). Por lo tanto, es un fenómeno que transforma la superficie al ocurrir un cambio y simplificación del paisaje, además de empobrecer y reducir la estabilidad del ecosistema (Slaymaker *et al.*, 2009); todo ello dentro de un lapso corto de tiempo, siendo además perfectamente observable y diferenciable espacialmente. El cambio de uso de suelo resulta de tres principales procesos: deforestación, expansión de la frontera agrícola, y expansión de infraestructura (Figura I-1). Este tipo de factores suelen provocar cambios lentos en la estabilidad.

Deforestación

La deforestación se define como la acción del ser humano de eliminar masa arbórea para la extracción del recurso forestal o para el aprovechamiento del espacio. Su influencia en la ocurrencia de PRM quedó demostrada en el trabajo de Alcántara-Ayala *et al.* (2006) para la Sierra Norte de Puebla (México), quienes elaboraron un índice de homogeneidad como indicador de la fragmentación del paisaje para un año antes y otro después del desastre de 1999. Sus resultados obtenidos muestran que en superficies de la Sierra Norte de Puebla con una densidad de vegetación de entre 0 y 10% se encontraba el 70% de los cuerpos inestables, mientras que sólo el 6% de los PRM ocurrieron en zonas con densidades de 50 a 100%. Haciendo una revisión bibliográfica más amplia se puede

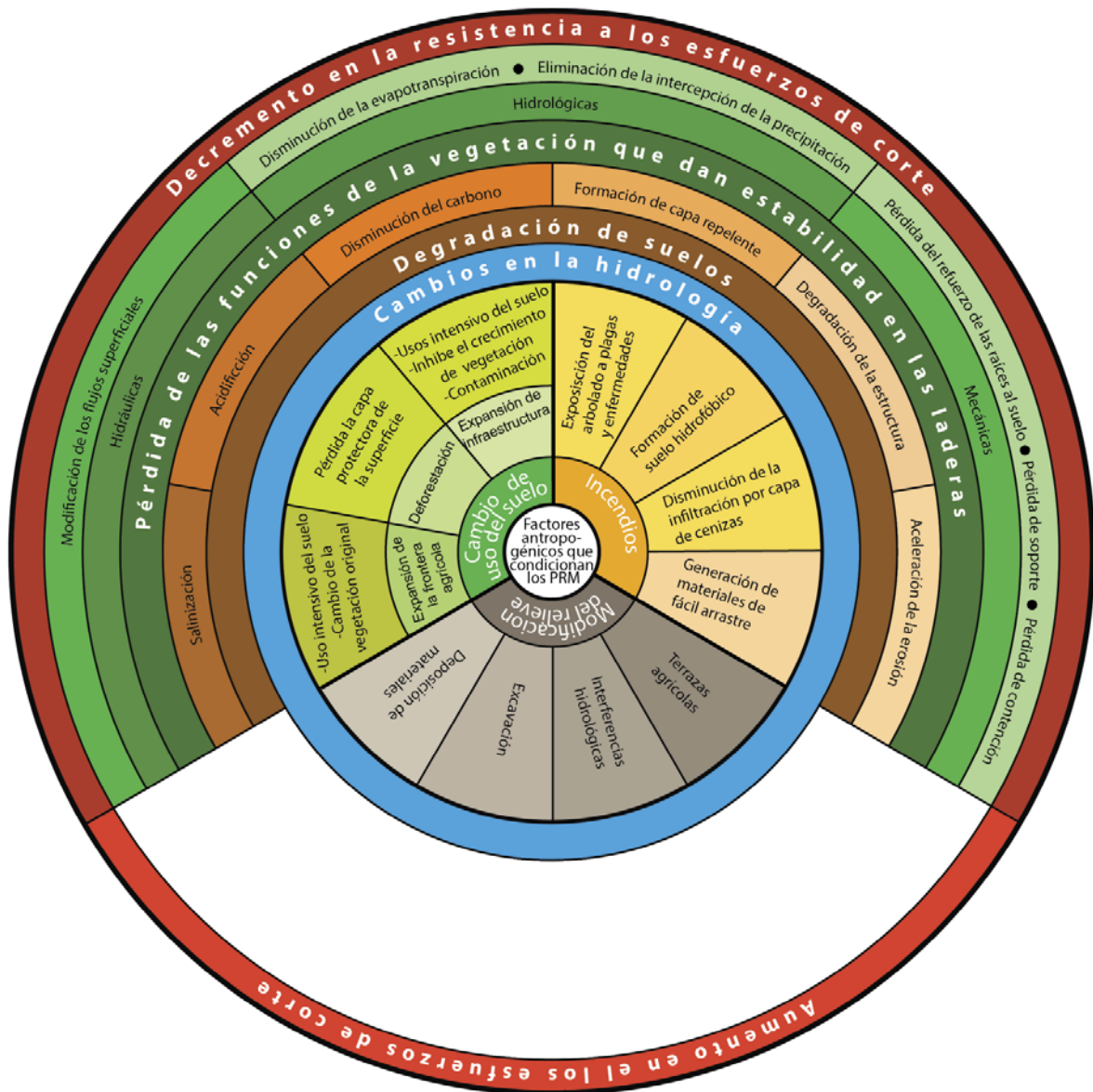


Figura I-1. Esquema-resumen de elaboración propia de los factores antropogénicos que condicionan en los procesos de remoción en masa y sus principales consecuencias. El esquema se lee del centro hacia afuera. En el centro se encuentran los tres factores antropogénicos seguidos por sus subtipos, con excepción de incendios. Le sigue las consecuencias para cada factor. A partir de los siguientes anillos aparecen tres de las principales consecuencias de los factores antropogénicos, que se deben de leer según lo que cubra el anillo: cambios en la hidrología, degradación de suelos y pérdida de las funciones de la vegetación que dan estabilidad en una ladera, marcando los efectos de las consecuencias. Por último, el anillo exterior indica el impacto principal causado en la estabilidad de laderas debido a factores antropogénicos.

concluir que la deforestación influye esencialmente en la inestabilidad en las laderas, a través de la pérdida de la protección de masa arbórea que amortigua el impacto de factores físicos sobre la superficie del terreno, regulando procesos hidrológicos, hidráulicos y mecánicos. (Glade, 2003; Schwarz *et al.*, 2010; Sidle y Ochiai, 2006; Stokes *et al.*, 2008; Styczen y Morgan, 1995).

Profundizando en esto último, se tiene que ante la eliminación del arbolado se pierden condiciones hidrológicas que favorecen la estabilidad del estrato superficial (hasta 5 m) (Styczen y Morgan, 1995). Por ejemplo, la evapotranspiración regula la humedad contenida en el suelo, y con ello permite en este último la conservación de su estructura, cohesión y resistencia al esfuerzo cortante. La vegetación es capaz de regular sus tasas de evapotranspiración para mantener la humedad o eliminar excesos. Stokes *et al.* (2008) encontraron que árboles espaciados entre sí, aumentan su evapotranspiración; pero en el caso de disminuir la humedad en el suelo cierra sus estomas para retener agua y así disminuir la evapotranspiración. Sidle y Ochiai (2006) compararon la evapotranspiración en una zona de clima templado con otra de clima tropical, demostrando que es de mayor importancia la evapotranspiración en la segunda zona ya que la vegetación tiene mayor capacidad para extraer la humedad del suelo al existir especies con hoja ancha. En consecuencia, la deforestación en un zona tropical significará un mayor impacto en la estabilidad de laderas.

El proceso de la intercepción de la precipitación por parte de la vegetación, es importante para la protección del suelo al disminuir la energía cinética de las gotas de lluvia al ser interceptadas primero por el follaje, además de modificar o retardar el ciclo hidrológico (Styczen y Morgan, 1995). El efecto de intercepción se divide en: traslocación directa, que corresponde a la precipitación que cae al suelo después de haber pasado por el follaje; e intercepción, que es el agua que queda retenida en la vegetación que posteriormente es evaporada sin llegar a la superficie. Styczen y Morgan (1995) refieren que la retención en bosques de coníferas y selvas puede llegar a ser entre 25% y 30% de la precipitación total, aunque Gallegos *et al.* (2006) reportó un 75% para una especie tropical (*Tectona grandis L. F.*) en México.

La eliminación del proceso de interceptación en una ladera, produce saturación rápida del suelo, lo que se traduce en un mayor escurrimiento superficial, incremento de presión de poro, abatimiento de la resistencia al cortante y en consecuencia, formación de deslizamientos superficiales.

La infiltración se ve afectada ante la deforestación. La infiltración depende de la estructura y tipo del suelo que favorece o permite una buena conductividad hidráulica (Marston, 2010). La vegetación contribuye de manera importante en la estructura del suelo a través de la aportación de materia orgánica, biomasa superficial (Marston, 2010), desarrollo de raíces y de actividad biológica (Styczen y Morgan, 1995). Ante la deforestación la cantidad de carbón en el suelo se ve disminuida. La presencia del carbón es relevante dado que da estabilidad a la estructura del suelo, favorece el desarrollo de raíces, aumenta la retención de agua, la disponibilidad de nutrientes y procesos microbianos (Blanco y Lal, 2008).

La deforestación modifica características hidráulicas relacionadas con la vegetación, las cuales tienen la propiedad de modificar los flujos superficiales. Una de estas características es la rugosidad producto de la microtopografía formada por la biomasa (Marston, 2010), capaz de controlar la velocidad y la generación de escorrentía (Styczen y Morgan 1995).

Uno de los efectos más conocidos y estudiados ante la eliminación del arbolado en laderas es el impacto en las propiedades mecánicas aportadas por la vegetación al suelo (Bathurst *et al.*, 2007, 2010; Dhakal y Sidle, 2003; García-Ruiz *et al.*, 2010; Van Beek y Van Asch, 2004; Zhang *et al.*, 2010). Es bien sabido el reforzamiento del suelo aportado por las raíces, las cuales favorecen el anclaje y cohesión del suelo. El aporte de las raíces estará dado por el tamaño de la raíz, arreglo espacial y su interacción con el suelo (Schwarz *et al.*, 2010; Stokes *et al.*, 2008). Las raíces también generan un efecto de soporte, es decir, no sólo anclan la porción de suelo donde se encuentra el árbol, sino tienen la capacidad de darle soporte a una masa mayor de suelo evitando procesos de reptación (Styczen y Morgan, 1995). Al reducir la densidad de árboles, se evita que las raíces de varios individuos se entrelacen y en ocasiones se injerten entre ellas formando una red que permitiría un mayor

soporte. El injerto es común entre raíces de crecimiento lateral y en especies de hoja decidua (Stokes *et al.*, 2009).

Debido a la eliminación de árboles se pierden troncos y raíces que ayudan en la contención de masas inestables y roca desprendida, reducción de áreas y velocidades de cuerpos inestables, y en consecuencia con la reducción del nivel de afectación (Schneider *et al.*, 2010).

El influjo de la deforestación en la ocurrencia de PRM es considerada en modelos determinísticos, los cuales calculan un factor de seguridad (FS) (Ec. I-1) (Norris *et al.*, 2008).

$$FS = (\text{Fuerzas estabilizadoras}) / (\text{Fuerzas desestabilizadoras}) \quad (\text{Ecuación I-1})$$

Tomando en cuenta las fuerzas que aporta la vegetación sobre la ladera. Un ejemplo es la ecuación de Greenwood (Norris *et al.*, 2008) (Ec. I-2), basado en el método de dovelas (Figura 2), donde las fuerzas estabilizadoras son: cohesión efectiva del suelo mejorada por el refuerzo de raíces (c'_R) (kN/m³), fuerza de tensión de las raíces (T) (kN/m), cohesión efectiva del suelo (c') (kN/m²). Como fuerzas desestabilizadoras: sobrepeso de la vegetación (W_v), fuerza de carga del viento (D_W) (kN/m²), presión del agua (u), fuerzas de agua interdovela (U_1 y U_2), y los parámetros que describen al cuerpo del deslizamiento: longitud del plano del deslizamiento (l) (m), peso del suelo (W) ángulo del plano del deslizamiento (α) (°), ángulo de fricción para presiones efectivas (ϕ) (°).

$$FS = \frac{\Sigma[(c' + c'_R)l + ((W + W_v) \cos \alpha - (u + \Delta u_v)l - ((U_2 + \Delta U_{2v}) - (U_1 + U_{1v})) \sin \alpha - D_W \sin(\alpha - \beta) + T \sin \theta) \tan \phi]}{\Sigma[(W + W_v) \sin \alpha + D_W \cos(\alpha - \beta) + T \cos \theta]}$$

(Ecuación I-2)

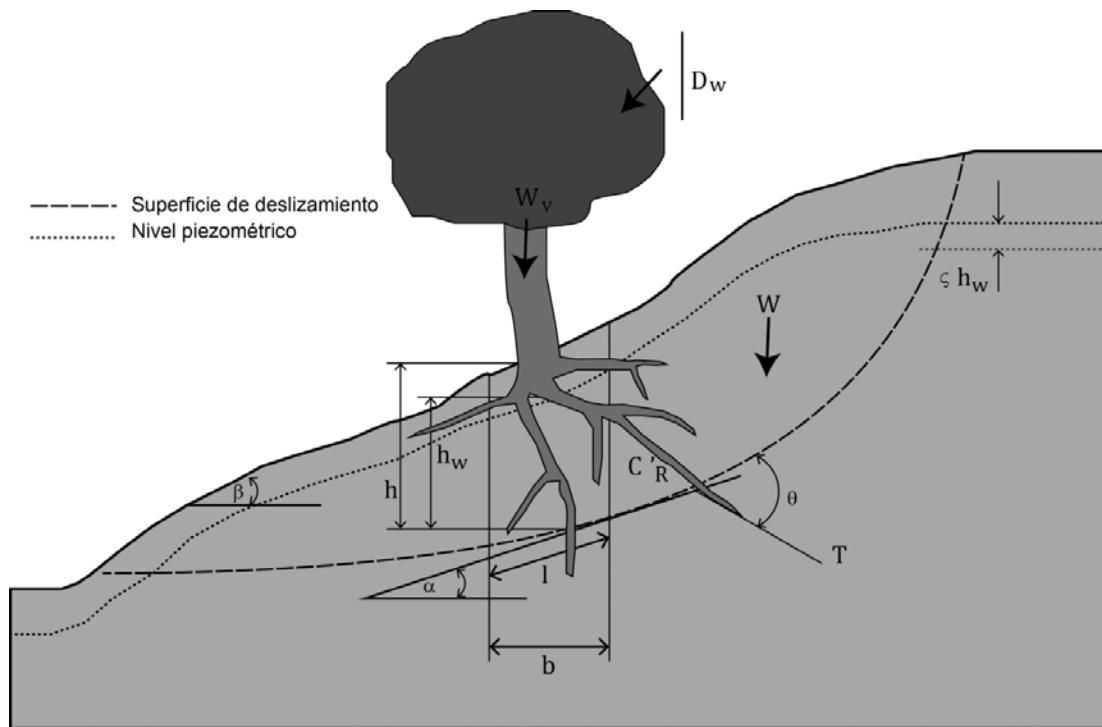


Figura I-2. Fuerzas sobre la ladera aportadas por la vegetación (Con base en Greenwood et al., 2004) donde " α " es el ángulo de la superficie de deslizamiento, " β " es el ángulo de la ladera, " C'_R " refuerzo de la cohesión dada por raíces finas, " b " ancho de la dovela, " h " altura promedio de la dovela, " l " longitud del plano del deslizamiento en la dovela, " h_w " distancia entre la superficie de deslizamiento y el nivel freático, " δh_w " cambio en la superficie freática debido a la absorción del agua por la vegetación, " W " peso total del suelo deslizado, " W_v " sobrepeso de la vegetación, " T " fuerza de tensión de las raíces actuando sobre la superficie de deslizamiento y " θ " ángulo de las raíces con referencia a la superficie de deslizamiento.

Otro ejemplo es el Modelo Dinámico Integrado de Estabilidad de Pendientes (*Integrated Dynamic Slope Stability Model -IDSSM-*) desarrollado por Dhakal y Sidle (2003). Este modelo consideró el decremento de la cohesión asociada a la eliminación de raíces, con base en modelos determinísticos donde establecieron tres escenarios en British Columbia: eliminación total del arbolado, cortes parciales y el de reforestación. En los resultados señalan que el efecto del corte del arbolado no es inmediato ya que después de los 8 y 15 años fue cuando ocurrieron más deslizamientos. Concluyen que ante la eliminación total del arbolado se incrementa la frecuencia de PRM, lo que no ocurre ante el corte parcial de

zonas arbóreas, también señalan que la reforestación ayuda a disminuir la frecuencia de PRM, pero con un efecto de estabilidad menor que las zonas con corte parciales.

Expansión de la frontera agrícola

Expansión de la frontera agrícola es el fenómeno de apropiación de una superficie con el objetivo de realizar actividades agropecuarias. De manera general se sabe que el uso agrícola empobrece el ecosistema y aumenta la susceptibilidad a cambios ambientales (Goudie, 2006; Steffen *et al.*, 2005). Desonie (2008) es claro en señalar que el uso agrícola, en general, incrementa la erosión ya que las prácticas de manejo más comunes dejan al suelo sin la protección de una capa vegetal (raíz, tallo, hojas), quedando vulnerable ante los efectos de la lluvia y gravedad, que son factores de inestabilidad de laderas (van Beek *et al.*, 2008).

Los impactos ocasionados por la expansión de la frontera agrícola presenta variabilidad, estos dependen de las demandas que involucre el tipo de cultivo, de la técnica de uso empleada y la temporalidad, es decir, de la intensidad de uso. Los elementos naturales con mayor impacto directo son el agua y el suelo, los cuales pueden incidir en la disminución de la resistencia al corte y por tanto se direcciona a establecer una relación con la estabilidad del suelo en una ladera. Ocurre la degradación del suelo como es la compactación (Marcotullio *et al.*, 2008) lo que incrementa la resistencia a la penetración de raíces y limita el intercambio de oxígeno y bióxido de carbono entre las zonas de raíces y la atmosfera (Goudie, 2006), lo que significa un decremento en las funciones de la vegetación que dan mayor resistencia al suelo. Las actividades agrícolas también aumentan la alcalinidad del suelo porque las sales como el sodio causan la dispersión de los coloides del suelo y la reducción de la porosidad (Vlek *et al.*, 2008).

Otra actividad que motiva el crecimiento de la frontera agrícola, además del cultivo, es la ganadería extensiva que es un sistema de pastoreo desarrollado principalmente en praderas o zonas de pastizales (FAO, 2010), aunque las zonas destinadas para este uso suelen estar intercalas con zonas de matorral y bosques abiertos (Gerritsen y Van der Ploeg, 2006). La ganadería extensiva se caracteriza por promover la deforestación o cambio de uso de suelo

con la intención de cultivar o inducir el desarrollo de pastizales que posteriormente serán consumidos por el ganado. En términos generales el pastoreo es causa de la degradación del suelo e impide el crecimiento de flora de un mayor valor sucesional, al destruir la renovación de especies arbóreas, al pisarlos o al comerlos (Trimble y Mendel, 1995). Uno de los principales problemas en las zonas de pastizal es su susceptibilidad a los incendios (Galindo *et al.*, 2009).

El caso mostrado por Gerrard y Gardner (2002) es un buen ejemplo de las consecuencias generadas por la expansión de la frontera agrícola. Los autores trabajaron en un lugar de Nepal que cuenta con coberturas y usos de pastizal, terrazas en laderas (*bari*), terrazas de irrigación en terrenos bajos de pendientes con poca inclinación usadas para la siembra del arroz (*khet*), bosques y matorrales. Los PRM se clasificaron como deslizamientos y flujos de detritos. Con base en los resultados concluyen de manera general que la deforestación no necesariamente lleva a una degradación directa, sino que dependen del uso agrícola subsecuente y el tipo de reforestación.

Expansión de infraestructuras

Con expansión de infraestructuras se entiende el proceso de edificación de vialidades como carreteras y la construcción de espacios urbanos; sus impactos se producen en dos etapas. La primera se relaciona con la transformación del medio original a través de la excavación y movimiento de tierras, afectando el sistema hidrográfico (Acho-Chi, 1998; Goudie, 2006) mediante la reducción de la infiltración y evapotranspiración (Marcotullio *et al.*, 2008), e incrementando la concentración de escurrimiento (Carvalho *et al.*, 2010; Goudie, 2006). La segunda etapa corresponde a impactos producidos por actividades que se desarrollan en ese espacio ya construido (desechos y actividades económicas contaminantes) (Desonie, 2008), alterando procesos hidrológicos como consecuencia de la construcción de una capa impermeable de asfalto o concreto.

Diversos estudios han demostrado que la construcción de caminos y expansión de la mancha urbana favorecen la generación de PRM y el incremento de riesgo (Muñiz-Jauregui y Hernández-Madrigal, 2012, Smyth y Royle, 2000). Wemple *et al.* (2001) considera que la

red de caminos son estructuras exóticas con procesos geomorfológicos, hidrológicos y ecológicos propios; capaces de afectar áreas locales o a toda la cuenca donde se desarrollan. Concluyen que los procesos geomorfológicos asociados a los caminos están fuertemente condicionados a la localización y tipo de construcción del camino, la roca y su estructura y a los regímenes de precipitación.

Preuth *et al.* (2010) realizaron un trabajo un PRM ocurrido en 2002 que afectó una zona urbana dañando casas y un camino en Pays de Herve, Bélgica. Estos autores mostraron que la concentración de iones a causa de químicos aportados por aguas contaminadas, reduce considerablemente la cohesión de las arcillas y en consecuencia la resistencia del suelo. Determinaron que a causa de una fuerte lluvia cuatro años antes de las mayores afectaciones, se desarrolló un deslizamiento que ocasionó la ruptura del drenaje incrementando la concentración de iones en la arcilla por la filtración de agua contaminada, lo que fue finalmente el factor de inestabilidad posterior que junto con una precipitación de baja intensidad ocasionaron las mayores afectaciones.

Incendios

El grado de impacto de los incendios está relacionado con su alto potencial para transformar el medio, tanto como su capacidad para propagarse y dañar grandes superficies. Los incendios, como factor antropogénico, pueden tener varios orígenes desde el provocado intencionalmente para eliminar la cubierta vegetal con fines agrícolas, hasta el causado inconscientemente al arrojar una colilla de cigarro. Una de las principales causas de incendios se debe a la falta de control en el momento de la quema en espacios agrícolas, originando que se extienda a otras áreas, como suelen ser hacia superficies forestales. Esto da como resultado la muerte de árboles o en el caso de sólo dañarlos se dejan expuestos a plagas y enfermedades, lo que también es un factor que induce a la deforestación (CONAFOR, 2010).

Las consecuencias de los incendios en la estabilidad de las laderas son variadas y se puede dar con diferentes mecanismos (Figura I-2) además que pueden generar cambios rápidos como lentos en la estabilidad de las laderas. Por ejemplo, en el caso del suelo ocurren

procesos de acidificación al propiciar la liberación de los nutrientes en formas de sales, así como afectación de la estructura del suelo por la degradación de la materia orgánica (Goudie, 2006); produciéndose un empobrecimiento de la fertilidad y en consecuencia un incremento en el potencial de erosión por lluvia (Mayor *et al.*, 2007). Los autores Gabet y Sternberg (2008) refieren que la ceniza producto del incendio al humedecerse, puede tener efectos negativos en la estabilidad de la ladera, al disminuir la capacidad de infiltración del suelo, lo que permite mayor concentración de escurrimientos que se mezclan con la ceniza, aumentando la capacidad de carga y de erosión. Otro fenómeno producto del impacto del uso del fuego es la formación del suelo hidrofóbico cuando se alcanzan temperaturas superiores a los 176°C (Tessler *et al.*, 2008). Es posible que sobre la capa de suelo hidrofóbico al paso del tiempo, se forme una nueva capa de sedimentos que será fácilmente removible ante la acumulación de humedad a causa de la capa impermeable que impide la infiltración (Wondzell y King, 2003) y favorece el escurrimiento superficial (Zavala *et al.*, 2009).

Se ha relacionado la ocurrencia de flujos de detritos en áreas afectadas por incendios (Cannon y Gartner, 2005), tanto por las afectaciones antes descritas, como por la generación de materiales que son fácilmente removilizados (cenizas, ramas y troncos), los cuales son arrastrados por escurrimientos, incrementando la fuerza de los flujos, o bien, son acumulados dentro de cauces formando represas que antes del aumento del caudal pueden ser removidas, produciendo crecidas que erosionan y arrastran materiales (Bendix y Cowell, 2010; Gabet y Sternberg, 2008).

Modificación del relieve

El ser humano tiene la capacidad técnica para transformar la superficie terrestre y crear un relieve antrópico (Bonachea *et al.*, 2010), y conforme mejora la eficiencia tecnológica incrementa su potencial para transformar el relieve. Este tipo de factores representan cambios rápidos en la estabilidad de una ladera. De acuerdo con Goudie (2006), la modificación del relieve resulta de actividades como: sedimentación de material (terraplenes y depósitos de jales de minas); excavación (cortes de talud en caminos, minas a

cielo abierto, cráteres producto de bombas etc.); interferencias hidrológicas (diques, represas, corrección y canalización de ríos); y por actividades agrícolas (terrazas) (Figura 2). Buccolini *et al.* (2007), muestran un ejemplo de cómo cambios en el relieve tienen efectos directos en la ocurrencia de PRM. Ellos exponen un caso de modificaciones del relieve con fines agrícolas en los Apeninos, concluyendo que la formación de terrazas agrícolas cambiaron las condiciones hidromorfológicas del lugar que junto con el uso reciente de maquinaria pesada coincide con el aumento y reactivación de cuerpos inestables.

En términos generales la modificación antropogénica del relieve se efectúa mediante los procesos de remoción, transferencia y acumulación de materiales. La remoción y acumulación de materiales tiene efectos positivos y adversos en la estabilidad de una ladera, en función de la geometría resultante de la modificación (Fig. I-3). Si la remoción o excavación se presenta en la base de la ladera; se elimina confinamiento, el centro de gravedad se desplaza ladera arriba incrementando la energía potencial del deslizamiento, y en consecuencia se incrementa el esfuerzo cortante (Fig. I-3B). Por otra parte, si la excavación se realiza en la parte alta de la ladera (“descopete”): se disminuye el volumen del cuerpo potencialmente inestable, el centro de gravedad se desplaza hacia la base de la ladera y en consecuencia se abate el esfuerzo cortante (Fig. I-3C). En el caso de la acumulación de materiales el efecto es contrario; es decir, si el depósito se coloca en la base de la ladera se mueve el centro de gravedad del cuerpo inestable disminuyendo el esfuerzo cortante (Fig. I-3D), y si el depósito se coloca en la parte alta de la ladera se incrementará el peso sobre el cuerpo inestable aumentando el esfuerzo de corte (Fig. I-3E). Bajo esta perspectiva y retomando el tema de la cobertura vegetal, los árboles de tallo grueso y altura elevada como los pinos, cedros y abetos; juegan un doble papel en la estabilidad de la ladera. Por una parte favorecen la estabilidad si se localizan en la parte baja de la ladera, pues con ello incrementan el confinamiento del cuerpo potencialmente inestable; y por otra, incrementan el esfuerzo cortante cuando se localizan en la parte alta, dado que constituyen pesos vivos que incrementan la masa del cuerpo en deslizamiento.

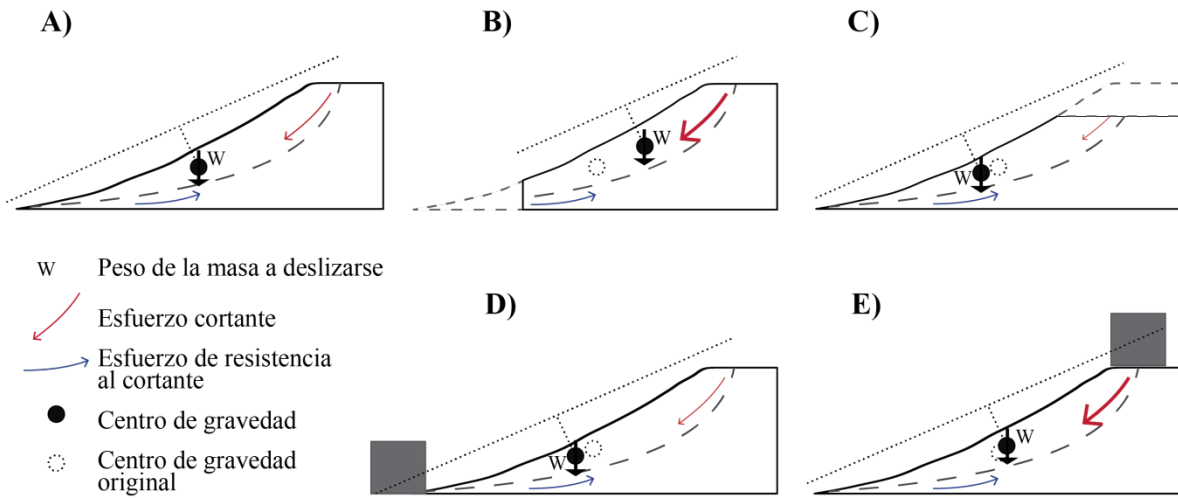


Figura I-3. Esquema idealizado del efecto en el centro de equilibrio de una ladera al ser modificada su forma original o al ser agregado elementos adicionales a la ladera. El inciso A) muestra la ladera original sin presentar afectaciones y en equilibrio en los esfuerzos cortantes y de resistencia al cortante. En el inciso B) se muestra la ladera con un corte en la base, lo que hizo que el centro de equilibrio (punto negro) se trasladara ladera arriba, incrementando el esfuerzo cortante. En el inciso C) se muestra la ladera con un corte en la parte superior lo que trasladó el centro de equilibrio a la base de la ladera, disminuyendo el esfuerzo cortante. En el inciso D) se colocó un material en la base de la ladera lo que trasladó el centro de equilibrio ladera abajo disminuyendo el esfuerzo cortante. En el inciso E) se colocó material en la parte alta de la ladera, lo que trasladó en el centro de gravedad ladera arriba, incrementando el esfuerzo cortante.

Un fenómeno multifactorial

En las secciones anteriores se ha podido constatar que al tratar un factor antrópico específico, es inevitable correlacionarlo con otros tipos de factores. En la realidad en una zona afectada por actividades antrópicas, más de uno de los factores aquí expuestos estarán presentes en la ocurrencia de PRM. Caballero *et al.* (2006), presentaron el caso de la ciudad de Motozintla, Chiapas, que fue afectada por flujos de detritos durante el paso de la tormenta tropical Earl en 1998. A partir de análisis estratigráficos de sedimentos se determinó el flujo estuvo compuesto de tres pulsos detonados por la intensidad y acumulación de la precipitación, pero resaltaron que los flujos de detritos iniciaron en zonas con presencia de caminos, tanto como deforestadas para ser usadas para pastoreo y agricultura. El trabajo de Knapen *et al.* (2006) es un buen ejemplo de ello. Se trata del caso de la ciudad de Manjiya, Uganda; en donde la población se asienta sobre laderas

deforestadas y cuya geometría original fue modificada por factores preparatorios: construcción de letrinas; excavaciones; y construcción de terrazas para viviendas, trazo de senderos o para fines agrícolas. Los principales impactos han sido la concentración de humedad y afectación al suelo por el uso de fertilizantes. Para conocer su impacto en la ladera se realizaron los tratamientos estadísticos Chi-cuadrada y el cálculo del coeficiente V de Cramer. Concluyendo que las afectaciones de origen humano juegan el mayor rol en la inestabilidad en estratos superficiales y como resultado de la deforestación y las transformaciones de las laderas.

Un trabajo similar al anterior fue presentado por Vanacker *et al.* (2003) para la cuenca de Gordeleg en los Andes ecuatorianos. Mediante modelos estocásticos con variables predictivas de uso de suelo, tiempo de deforestación, elevación, distancia al talveg, distancia a canales de irrigación, curvatura, pendiente y orientación de la pendiente; obtuvieron como resultado que el uso, suelo y el tiempo de deforestación constituyen las variables de mayor influencia en el proceso predictivo. Posteriormente, aplicaron el método de regresión lineal para considerar la intercorrelación entre las variables. Los resultados indicaron que la susceptibilidad a PRM tiene una fuerte dependencia con la distribución espacial de la humedad y con las áreas recientemente deforestadas. Se aplicó el modelo TOPOG basado en el modelo de pendiente infinita, lo que permitió modelar escenario de dichos índices según los cambios de uso de suelo para los diferentes años; además de proyectar las implicaciones del cambio de uso del suelo para los siguientes 18 años. De manera general terminan concluyendo que la susceptibilidad a PRM tiene una alta dependencia a los cambios recientes en las coberturas y los usos de suelo en particular de vegetación secundaria a pastizal o cultivo, junto con las geoformas que permiten una mayor concentración de humedad, sin tener una fuerte relación con altos grados de inclinación de la ladera. También refieren que existe una relación en la presencia de flujos de detritos y de lodos con la cercanía a canales de irrigación, lo que contribuye al incremento de la saturación del suelo.

DISCUSIÓN

Con base en los resultados de los diferentes estudios aquí revisados, se establece que el factor antropogénico presenta un efecto indirecto y retardado sobre la inestabilidad de laderas. El ejemplo más claro de ello se tiene en la eliminación de la cobertura vegetal, cuyos efectos negativos sobre la estabilidad de las laderas se observan hasta el próximo periodo de lluvias para el caso de los incendios, e incluso hasta después de varios años cuando se trata de deforestación. Evaluar cuantitativamente el abatimiento de la estabilidad de una ladera producida por el factor antropogénico es una tarea casi imposible de realizar, no sólo por lo anteriormente citado, sino porque además existen factores topográficos, geológicos y climáticos que alteran el efecto antropogénico. No obstante, la ecuación de Greenwood constituye una buena aproximación para evaluar determinísticamente el impacto antropogénico; su originalidad estriba en considerar como variables las fuerzas proporcionadas por la vegetación. Sin embargo, entre sus limitaciones principales se tiene el no considerar la retención y evapotranspiración como factores reguladores de la humedad del suelo y en consecuencia de la presión de poro y resistencia al cortante; además de que las fuerzas dependen de la especie y madurez de la vegetación, necesitándose estudios muy especializados para su obtención por lo que la ecuación presenta aplicación limitada.

Con base en los datos expuestos se puede determinar que en realidad el factor antropogénico es un factor preparatorio muy activo y dinámico, que reduce directa e indirectamente el margen de estabilidad de las laderas y en consecuencia contribuye a la formación de PRM.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos a CONACYT por los recursos otorgados y al proyecto 134575 de Ciencia Básica CONACYT.

REFERENCIAS

- Acho-Chi, 1998, Human interference and environmental instability: addressing the environmental consequences of rapid urban growth in Bamenda, Cameroon: *Environment and Urbanization* 10(2), 161-174.
- Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O., Parrot, J. F., 2006, Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico: *Catena* 65, 152-165.
- Bathurst, J., Bovoloa, C. I., Cisnerosb, F., 2010, Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale: *Ecological Engineering* 36(3), 317-327.
- Bathurst, J., Moretti, G., El-Hames, A., Beguería, S. y García-Ruiz, J. M., 2007, Modelling the impact of forest loss on shallow landslide sediment yield, Ijuez river catchment, Spanish Pyrenees: *Hydrology & Earth System Sciences* 11(1), 569-583.
- Bendix, J., Cowell, M., 2010, Fire, floods and woody debris: Interactions between biotic and geomorphic processes: *Geomorphology* 116, 297-304.
- Blanco, H., Lal, R. 2008, *Principles of Soil Conservation and Management*. Springer
- Bonachea, J., Bruschi, V. M., Hurtado, M. A., Forte, L.M., da Silva, M., Etcheverry, R., Cavallotto, J. L., Dantas, M. F., Pejon, O. J., Zuquette, L. V., Bezerra, M., Remondo, J., Rivas, V., Gómez-Arozamena, J., Fernández, G., Cendrero, A., 2010, Natural and human forcing in recent geomorphic change; case studies in the Rio de la Plata basin: *Science of the Total Environment* 408(13), 2674-2695.
- Borgatti, S., Soldati, M., 2005, Geomorphological hazard and human impact in mountain environments: an introduction: *Geomorphology* 66, 7-11.
- Braimoh, A., Vlek, P., (Ed), 2008, *Land Use and Soil Resources*. Springer. 253 pp.
- Buccolini, M., Gentili, B., Materazzi, M., Aringoli, D., Pambianchi, G., Piacentini, T., 2007 Human impact and slope dynamics evolutionary trends in the monoclinal relief of Adriatic area of central Italy: *Catena* 71, 96-109.
- Caballero, L., Macías, J., García-Palomo, A., Saucedo, G., Borselli, L., Sarocchi, D. Sánchez, J., 2006, The September 8-9, 1998 Rain-Triggered Flood Events at Motozintla, Chiapas, Mexico: *Natural Hazards* 39, 103-126.

- Cannon, S., Gartner, J., 2005, Wildfire-related debris flow from a hazards perspective. En: Jakob, M., Hungr, O., (Ed), Debris-Flow Hazards and Related Phenomena, UK: Springer-Praxis. 739 pp.
- Carvalho, J. O., Guimaraes, R., Freitas, L., Gomes-Loebmann, D., Gomes, R. A., Martins, E., Montgomery, D. R., 2010. Urbanization impacts upon catchment hydrology and gully development using mutli-temporal digital elevation data analysis: *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 611-617.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal), 2010, Efectos de los Incendios. www.conafor.gob.mx.
- Desonie, D., 2008, *Geosphere: the land and its uses. Our fragile planet*. USA: Chelsea House books.
- Dhakal, A., Sidle, R., 2003, Long-term modelling of landslides for different forest management practices: *Surface Processes and Landforms* 28, 853-868.
- FAO (Food and Agriculture Organization), 2010, *Ganadería Extensiva o Granjas de Pastoreo en Plantaciones de Árboles en Zonas Húmedas y Sub-húmedas*. www.fao.org .
- Gabet, E., Sternberg, S., 2008, The effects of vegetative ash on infiltration capacity, sediment transport, and the generation of progressively bulked debris flows: *Geomorphology* 101, 666-673.
- Galindo, I., Barrón, J., Padilla, J. I., 2009, Relación entre ganadería extensiva e incendios en zonas forestales del estado de Colima: *Avances en Investigación. Agropecuaria* 13(3), 17-33.
- Gallegos, A., García, A., Parada, B., Benavides, J., 2006, Cuantificación de agua y carbono en plantaciones de *Tectona grandis*, L.F., en Bahía de Banderas, Nayarit, México. En: Segundo Congreso Latinoamericano IUFRO, La Serena, Chile, 23-27 de octubre 2006. Chile
- García-Ruiz, J., Beguería, S., Alatorre, L., Puigdefábregas, J., 2010, Land cover changes and shallow landsliding in the flysch sector of the Spanish Pyrenees: *Geomorphology* 124, 250-259.
- Gerrard, J., Gardner, R., 2002, Relationship Between Landsliding and Land Use in the Likhu Khola Drainage Basin, Middle Hills, Nepal: *Mountain Research and Development* 22(1), 48-55.

- Gerritsen, P., Van der Ploeg, J., 2006, Dinámica espacial y temporal de la ganadería extensiva: estudio de caso de la Sierra de Manantlán en la costa sur de Jalisco: *Relaciones* 108, 165-191.
- Glade, T., 2003, Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand: *Catena* 51, 297-314.
- Goudie, A., 2006, *The human impact on the natural environment: past, present, and future.* UK: Blackwell Publishing. 376 pp.
- Goudie, A., 2010, Foreword. En: Szabó J, Dávid L, Lóczy D (Ed), *Anthropogenic Geomorphology: Dordrecht Heidelberg London New York.* Springer. 298 pp.
- Greenwood, J. R., Norris, J. E., Wint, J., 2004, Assessing the contribution of vegetation to slope stability, *Geotechnical Engineering* 157, 199-208.
- Hernández-Madrigal, V. M., Mora-Chaparro, J. C., Garduño-Monroy, V. H., 2011, Large block slide at San Juan Grijalva, Northwest Chiapas, Mexico: *Landslides* 8 (1), 109-115.
- Hooke, R. L., 2000, On the history of humans as geomorphic agents: *Geology* 28(9), 843-846.
- James, L., Marcus, W., 2006, The human role in changing fluvial systems: Retrospect, inventory and prospect: *Geomorphology* 79, 152-171.
- Knapen, A., Kitutu, M., Poesen, J., Breugelmans, W., Deckers, J., Muwanga, A., 2006, Landslides in a densely populated county at the footslopes of Mount Elgon, Uganda: Characteristics and causal factors: *Geomorphology* 73, 149-165.
- Lerche, I., Glaesser, W., 2006, *Environmental Risk Assessment: Quantitative Measures, Anthropogenic Influences, Human Impact.* Berlin. Springer 343 pp.
- Liverman, D. M., Roman Cuesta, R. M., 2008, Human interactions with the Earth system: people and pixels revisited: *Earth Surface Processes and Landforms* 33, 1458-147.
- Lugo-Hubp, J., Zamorano-Orozco, J. J., Capra, L., Inbar, M., Alcántara-Ayala, I., 2005, Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causa y efectos: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 22(2), 212-228.
- Marcotullio, P., Braimoh, A., Onishi, T., 2008, The Impact of Urbanization on Soils. En: Braimoh A, Vlek P (Ed), *Land Use and Soil Resources.* Springer 253 pp.

- Marsh, G. P., 1864, *Man and nature: or Physical Geography as Modified by Human Action*. New York: Ch. Scribner.
- Marston, R., 2010, Geomorphology and vegetation on hillslopes: Interactions, dependencies, and feedback loops: *Geomorphology* 116, 206-217.
- Mayor, A. G., Bautista, S., Llovet, J., Bellot, J., 2007, Post-fire hydrological and erosional responses of a Mediterranean landscape: Seven years of catchment-scale dynamics: *Catena* 71: 68-75.
- Muñiz-Jauregui, J. A., 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.
- Norris, J. E., Greenwood, J. R., Achim, A., Gardiner, B. A., Nicoll, B., Cammeraat, E., Mickovski, S. B., 2008, Hazard Assessment Of Vegetated Slopes. En: Norris, J. E., Stokes, A., Mickovski, S. B., Cammeraat, E., van Beek, R., Nicoll, B., Achim, A., (Ed), *Slope Stability And Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. Dordrecht. Springer, 290 pp.
- Nossin, J., 1972, Landsliding in the Crati basin, Calabria, Italy: *Geologie en mijnbouw* 51: 591-607.
- Preuth, T., Glade, T., Demoulin, A., 2010, Stability analysis of a human-influenced landslide in eastern Belgium: *Geomorphology* 120, 38-47.
- Rivas, V., Cendrero, A., Hurtado, M., Cabral, M., Giménez, J., Forte, L., 2006, Geomorphic consequences of urban development and mining activities; an analysis of study areas in Spain and Argentina: *Geomorphology* 73, 185-206.
- Schneider, H., Höfer, D., Irmeler, R., Daut, G., Mäusbacher, R., 2010, Correlation between climate, man and debris flow events - A palynological approach: *Geomorphology* 120, 48-55.
- Schwarz, M., Lehmann, P., Or, D., 2010, Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes - from a bundle of roots to tree stands: *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 354-367.
- Selby, M. J., 1979, Slopes and weathering. En: Gregory KJ, Walling DE (Ed) *Man and Environmental Processes*: Dawson, Folkestone, 276 pp.

- Sidle, R. C., Ochiai, H., 2006, Landslides: Processes, Prediction, and Land Use. USA: American Geophysical Union.
- Sidle, R. C., Pearce, A. J., O'loughlin., C. L., 1985, Hillslope stability and land use. Water Resources Monograph 11. USA: American Geophysical Union.
- Slymaker, O., Spencer, T., Embleton-Hamann, C., (Ed), 2009, Geomorphology and Global Environmental Change. USA: Cambridge.
- Smyth, C. G., Royle, S. A., 2000, Urban landslide hazards: incidence and causative factors in Niterói, Rio de Janeiro State, Brazil: *Applied Geography* 20, 95-117.
- Steffen, W., Sanderson, A., Tyson, P. D., Jäger, J., Matson, P.A., Moore III, B., Oldfield, F., Richardson, K., Schellnhuber, H.J., Turner II, B. L., Wasson, R. J., 2005, *Global Change and the Earth System: A Planet Under Pressure*. Heidelberg. Springer, 258 p.
- Stokes, A., Atger, C., Bengough, A. G., Fourcaud, T., Sidle, R.C., 2009, Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides: *Plant Soil* 324, 1-30.
- Stokes, A., Norris, J. E., van Beek, R., Bogaard, T., Cammeraat, E., Mickovski, S. B., Jenner, A., Di Iorio, A., Fourcaud, T., 2008, How Vegetation Reinforces Soil On Slopes. En: Norris, J.E., Stokes, A., Mickovski, S. B., Cammeraat, E., van Beek, R., Nicoll, B., Achim, A., (Ed), *Slope Stability And Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. Dordrecht. Springer, 290 pp.
- Styczen, M., Morgan, R., 1995, Engineering properties of vegetation. En: Morgan, R. y Rickson, R., (Ed), *Slope stabilization an erosion control: a bioengineering approach*. London: E y F N Spon. 288 pp.
- Swanson, F. J., Dyrness, C. T., 1975, Impact of clearcutting and road construction on soil erosion by landslides in the western Cascades, Oregon: *Geology* 3(7): 393–396.
- Tessler, N., Wittenberg, L., Malkinson, D., Greenbaum, N., 2008, Fire effects and short-term changes in soil water repellency - Mt. Carmel, Israel: *Catena* 74: 185-191.
- Trimble, S., Mendel, A., 1995, The cow as a geomorphic agent- A critical review: *Geomorphology* 13: 233-253.
- Turner II, B. L., Roger, E. K., William, B. M., Kirstin, M. D., Dominic, G., Jeanne, X. K., Robert, C. M., Samuel, J. R., 1990, Two types of global environmental change: definitional and spatial-scale issues in their human dimensions: *Global Environmental Change* 1(1): 14-22

- Turner II, B. L., 2009, Land Change (Systems) Science. En: Castree, N., Demeritt, D., Liverman, D., Rhoads, B., (Ed), A Companion to Environmental Geography. Blackwell Publishing, 588 pp.
- Van Beek, R., Cammeraat, E., Andreu, V., Mickovski, S. B., Dorren, L., 2008, Hillslope Processes: Mass Wasting, Slope Stability And Erosion. En Norris, J. E., Stokes, A., Mickovski, S.B., Cammeraat. E., van Beek, R., Nicoll, B., Achim, A., (Ed,) Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions, Dordrecht Springer 290 p.
- Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Dewitte, O., Demoulin, A., De Bo, H., Vanmaercke-Gottigny, M. C., 2007, Reactivation of old landslides: lessons learned from a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium): Soil Use and Management 23, 200-211
- Vanacker, V., Govers, G., 2007, Introduction to land use change and geomorphic, soil and water processes in tropical mountain areas: Geomorphology 87, 1-3.
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., De Bievre, B., 2003, Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean: Geomorphology 52, 299-315.
- Varnes, D., 1978, Slope Movement Types and Processes. En: Schuster, R., Krizek, R., (Ed), Special report 176: Landslide: Analysis and Control, TRB, National Research Council, Washigton D.C. 234 pp.
- Vlek, P. L. G., Hillel, D., Braimoh, A. K., 2008, Soil Degradation Under Irrigation. En: Braimoh, A., Vlek, P., (Ed), 2008, Land Use and Soil Resources. Springer. 253 pp.
- Von Storch, H., Stehr, N., 2006, Anthropogenic Climate Change: A Reason for Concern Since the 18th Century and Earlier: Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography 88A(2), 107-113.
- Wemple, B. C., Swanson, F. J., Jones, J. A., 2001, Forest roads and geomorphic process interactions, Cascade Range, Oregon: Earth Surface Processes and Landforms 26: 191-204.
- Wondzell, S. M., King, J. G., 2003, Postfire erosional processes in the Pacific Northwest and Rocky Mountain regions: Forest Ecology and Management 178: 75-87.
- Zavala, L. M., González, F. A., Jordán, A., 2009, Fire-induced soil water repellency under different vegetation types along the Atlantic dune coast-line in SW Spain: Catena 79: 153-162.

Zhang, C., Chen, L., Liu, Y., Ji, X., Liu, X., 2010, Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength: *Ecological Engineering* 36, 19-26.

Capítulo II

MARCO FÍSICO-GEOGRÁFICO

DEL MUNICIPIO DE FRANCISCO LEÓN, CHIAPAS

MARCO FÍSICO-GEOGRÁFICO DEL MUNICIPIO DE FRANCISCO LEÓN, CHIAPAS

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este capítulo es mostrar las condiciones físico-geográficas del área de estudio (zona de influencia del municipio de Francisco León, Chiapas), como el contexto en el cual se desarrolló esta tesis. Las secciones aquí descritas fueron parte de los trabajos elaborados a lo largo del estudio como insumos de apoyo para conocer y comprender los procesos que han ocurrido y que se relacionan con la formación de PRM.

HIPSOMETRÍA

La zona de estudio tiene un gradiente de altitud que va de los 70 msnm a los 1,800 msnm (Fig. II-1) lo que representa una diferencia de 1,730 metros. Las altitudes menores se encuentran en el extremo noroeste próximo al río Grijalva y las más altas en el extremo sureste. Sobresalen dos elevaciones, una es el volcán Chichonal con una altitud promedio de 1,080 msnm, la otra elevación se encuentra al centro-sur con una elevación máxima de 1,600 msnm. Las zonas más bajas corresponden a los valles, siendo la parte más baja y principal en el área por su extensión en la zona de estudio, el valle del río Magdalena. El rango altitudinal que presenta mayor frecuencia es de 450 a los 650 msnm.

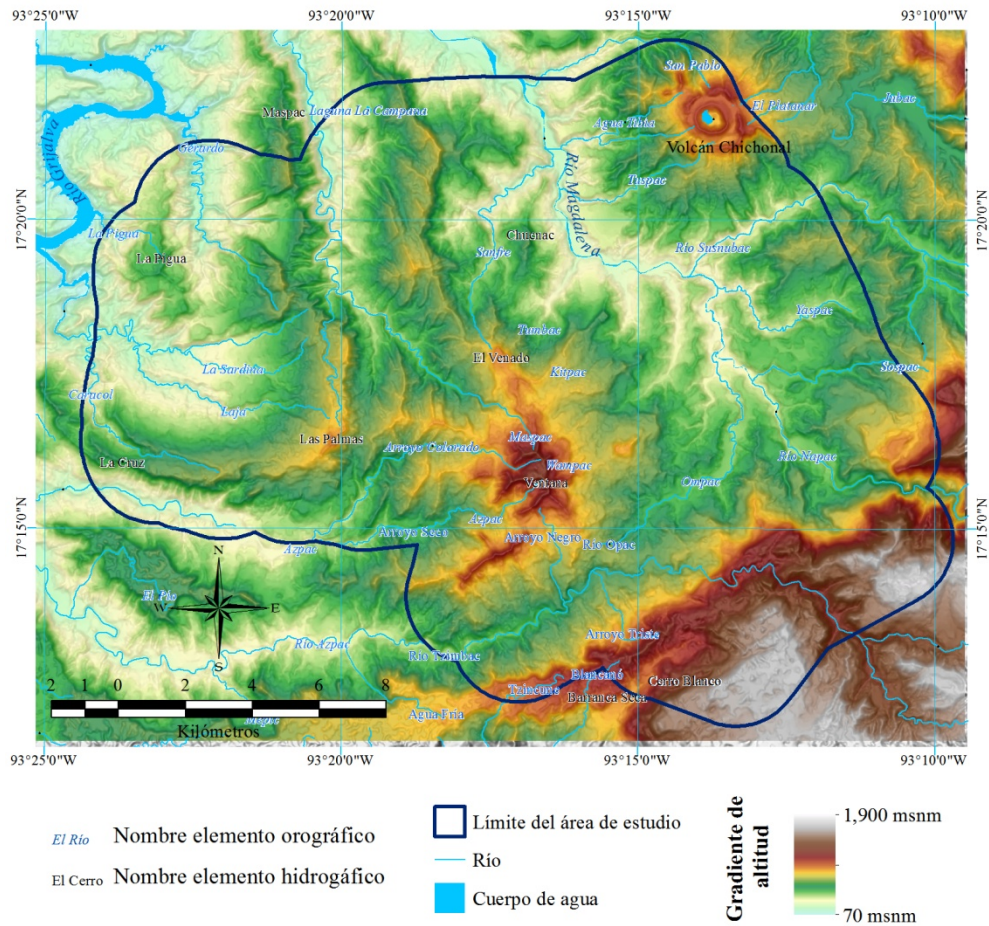


Figura II-1. Mapa hipsométrico del área de estudio y colindantes.

GEOLOGÍA

El área de estudio se encuentra dentro de la Provincia Geológica del Cinturón Plegado de Chiapas, descrito por Padilla (2007) como: "provincia constituida por rocas carbonatadas que varían en edad desde el Jurásico tardío hasta el Paleógeno, mismas que fueron deformadas durante el Mioceno Tardío dando lugar a un conjunto de pliegues asimétricos orientados NW-SE y con una vergencia general al NE. Después de este evento orogénico, como resultado del desalojo de grandes volúmenes de sal y arcilla, se formaron cuencas extensionales cuya dirección de extensión está orientada casi a 90° de los ejes de los pliegues de la cadena.... la Sierra de Chiapas es una cadena plegada y cabalgada atípica que no presenta en su frente tectónico una cuenca de antepaís..."

La identificación de la geología del área de estudio se basó en la carta geológica E1508 escala 1:250,000 del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (INEGI, 1982), tanto como en la cartografía presentada en CFE, escala 250,000 (Comisión Federal de Electricidad) (CFE, 2008). Estas cartografías fueron editadas, detalladas y complementadas con la información obtenida en los recorridos de campo, interpretación morfológica sobre el modelo sombreado e interpretación visual de imágenes SPOT 5 (Fig. II-2).

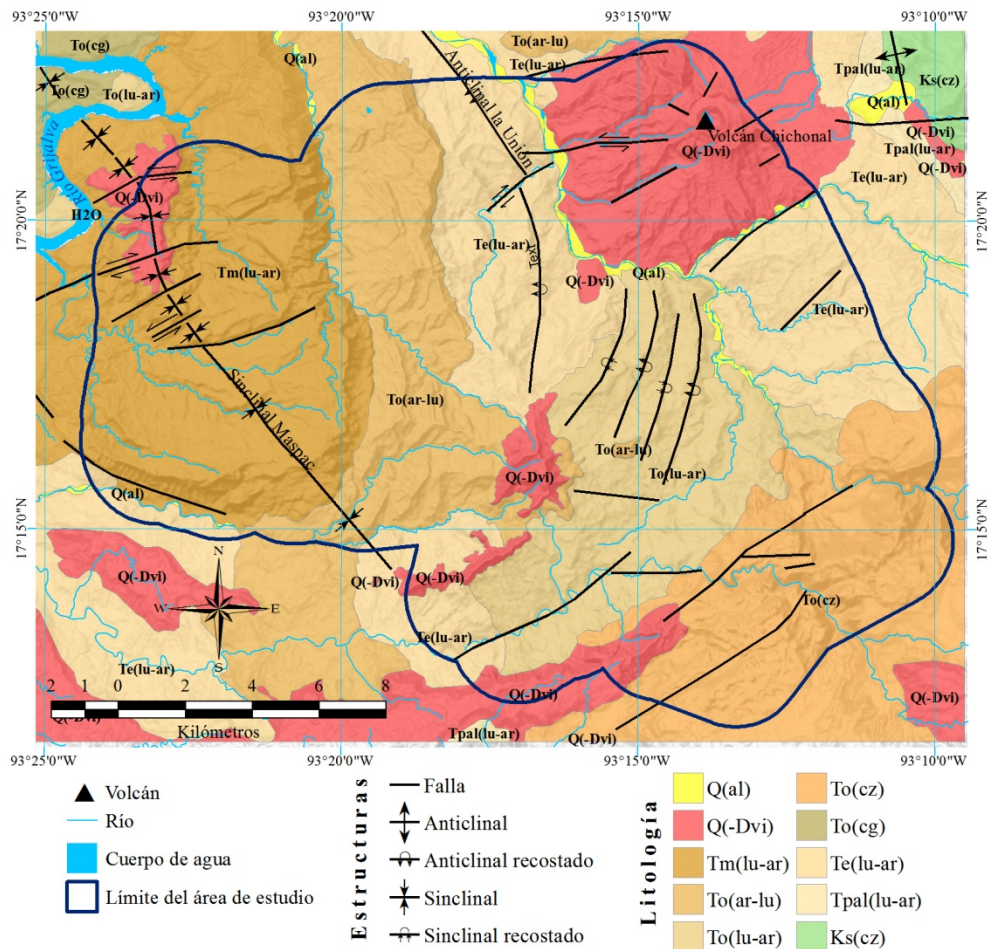


Figura II-2. Mapa geológico del área de estudio.

La litología de la zona de estudio está dominada (56%) por la presencia de capas estratificadas de lutitas-areniscas (lu-ar) (Tabla II-1), que de acuerdo con la carta de INEGI (1982) se trata de depósitos datados con distintas edades. Las unidades son: lu-ar del Eoceno (Fig. II-4A), corresponde a las unidades observadas en campo como una asociación

de estratos donde las areniscas suelen encontrarse en capas con espesores no mayores a los 40 cm, además de presentar los menores espesores entre estratos, en comparación de otras unidades presentes en la zona, otra característica es su tono de gris que es el más oscuro para la zona de estudio. Las lu-ar del Oligoceno (Fig. II-4B) se caracterizan por sustratos con mayor espesor que conforme se desciende en altitud el espesor de los estratos de lutita se incrementa. En las areniscas-lutitas (ar-lu) (Fig. II-4C) del Oligoceno, los estratos de areniscas presentan mayor espesor que los de lutitas, en ocasiones sus espesores llegan a ser mayores de 1.5m. Las calizas del Oligoceno fueron identificadas sólo con base en la cartografía utilizada. La unidad de lu-ar del Mioceno (Fig. II-4D) se caracteriza por un tono menos oscuro y la regularidad entre espesores de los estratos. En el área está dominada por las estructuras del sinclinal Maspac y el anticlinal la Unión (Macías *et al.*, 2008, Wendell, 1984), los cuales forman un relieve invertido y cuyos planos axiales presentan una dirección preferencial del NE-SE (Macías *et al.*, 2008).

Cuaternario	Holoceno	Qal
	Pleistoceno	Q(-Dvi)
Neógeno	Plioceno	?
	Mioceno	Tm(lu-ar)
Paleógeno	Oligoceno	To(ar-lu) To(cz) To(lu-ar)
	Eoceno	Te(lu-ar)

Figura II-3. Columna estratigráfica de las litologías presentes en la zona de estudio interpretada de la carta geológica 1:250000 de INEGI.

La unidad denominada depósito volcánico cuaternario de composición intermedia (Q(-Dvi)), se agrupó la litología de origen ígneo extrusivo. Se compone de depósitos formados por fragmentos subredondeados de rocas intermedias en una matriz de ceniza poco compactada, presentando afloramientos de rocas en forma de monolitos que se distribuyen de manera dispersa en el área (Fig. II-4E) y del edificio del volcán Chichonal constituido por andesitas potásico-alcalinas (Layer, 2009), considerado mineralógico y geoquímico distinto del resto de los volcanes de la Faja Volcánica Transmexicana y el Arco Volcánico Centroamericano (Manea y Manea, 2008).

El volcán Chichonal forma parte del Cinturón Volcánico Chiapaneco (Macías *et al.*, 2008) y estructuralmente Macías (2005) refiere que el Chichonal "se ubica dentro de las Provincia de Fallas Laterales Motagua-Polochic (Meneses-Rocha, 2001). Localmente, las rocas del basamento del Chichón están afectadas por fallas orientadas E-W con movimiento lateral izquierdo, como la falla San Juan y por fallas normales de rumbo N45°E, con planos buzando en dirección NW, conocidas como la zona de fallas de Chapultenango (García-Palomo *et al.*, 2004)". Layer y colaboradores (2009), refieren que el Chichonal inició su actividad hace 370,000 años. Macías y colaboradores (2008) establecieron con base en la actividad registrada en los últimos 4,000 años, que el intervalo de recurrencia es en promedio de 300 años, con un rango que tienen como mínimo 100 años y máximo 600 años. La última erupción ocurrió en 1982, presentando actividad del tipo pliniana, lo que provocó caída de ceniza, oleadas piroclásticas húmedas, flujos piroclásticos y lahares, causando la muerte de más de 2,000 personas, destruyendo siete poblados (Macías, 2005, Macías *et al.*, 2008). Los productos de los diferentes eventos de la erupción de 1982 fueron depositados principalmente al NE del volcán (Macías *et al.*, 2008). Para la zona de estudio los depósitos son importantes sólo en un radio promedio de 10 km del cráter y son espesores máximo entre 30 y 40 cm, no se observó una continuidad espacial ya que se encontraron depósitos dispersos.

Tabla II-1. Superficie por unidad litológica en el área de estudio

<i>Unidad litológica</i>	<i>Clave</i>	<i>Superficie (has)</i>	<i>Porcentaje</i>
Aluvial	Q(al)	416.39	1%
Depósitos volcánicos cuaternario de composición intermedia	Q(-Dvi)	5,425.89	15%
Lutita-arenisca del Mioceno	Tm(lu-ar)	7,451.56	20%
Arenisca-lutita del Oligoceno	To(ar-lu)	5,096.04	14%
Caliza del Oligoceno	To(cz)	5,066.33	14%
Lutita-arenisca del Oligoceno	To(lu-ar)	5,815.33	16%
Lutita-arenisca del Eoceno	Te(lu-ar)	7,376.49	20%
Total		36,648.03	100%

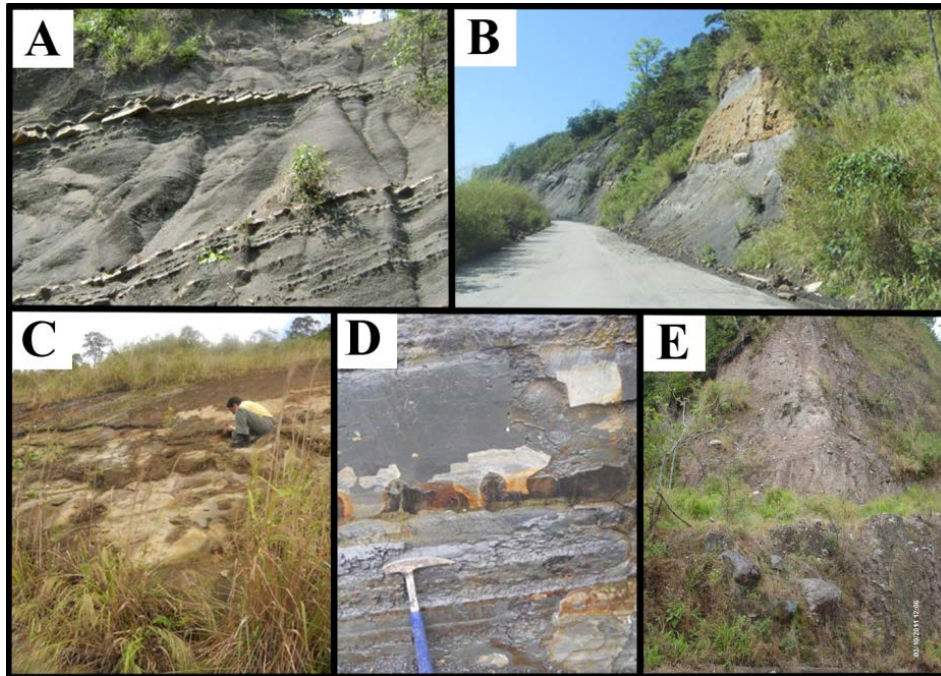


Figura II-4. Imágenes de las unidades litológicas identificadas en campo. A) Te(lu-ar), B) To(lu-ar), C) To(ar-lu), D) Tm(lu-ar), E) Q(-Dvi).

CLIMATOLOGÍA

Conforme al mapa de climas de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (García, E.-CONABIO, 1998) basada en la clasificación de Koppen modificada por García, el área de estudio tiene un clima tipo A(f) descrito como Cálido húmedo, con una temperatura media anual mayor de 22°C y temperatura del mes más frío es mayor de 18°C con precipitación del mes más seco mayor de 40 mm; lluvias entre verano e invierno mayores al 18% anual. Para este trabajo se elaboró un mapa de precipitaciones (Fig. 04) con el registro histórico de 15 estaciones meteorológicas cercanas y disponibles en la base de datos del ERIC III (IMTA, 2006) que fueron interpoladas con el método de Kriging, usando un modelo de semivariograma Gausiano (Yan-bing, 2002). El resultado mostró que la distribución de las precipitaciones varían entre 2,700 a los 4,600 mm anuales, lo que significa una variación total de 1,900 mm a lo largo de sólo 15.5 km (Fig. II-5). La rápida disminución puede ser un indicador de que el volcán Chichonal funciona como una barrera topográfica que capta las precipitaciones provocando esa disminución (1,900 mm), tal como se puede ver el perfil topográfico comparado con la línea de precipitación (Fig. II-5).

Como ejemplo del régimen de precipitación se muestran los datos de la estación 7365 (Fig. II-6) estación cercana a la zona de estudio. Estos datos señalan que el mes con menor precipitación es abril con un promedio de 119 mm y el mes con mayor lluvia es octubre con un promedio de 514 mm y con un promedio anual de 3,294 mm. En el anexo se encuentran los climogramas de las otras ocho estaciones más cercanas al área de estudio, que muestran como los meses de septiembre y octubre son los más lluviosos y marzo el mes con las menores precipitaciones.

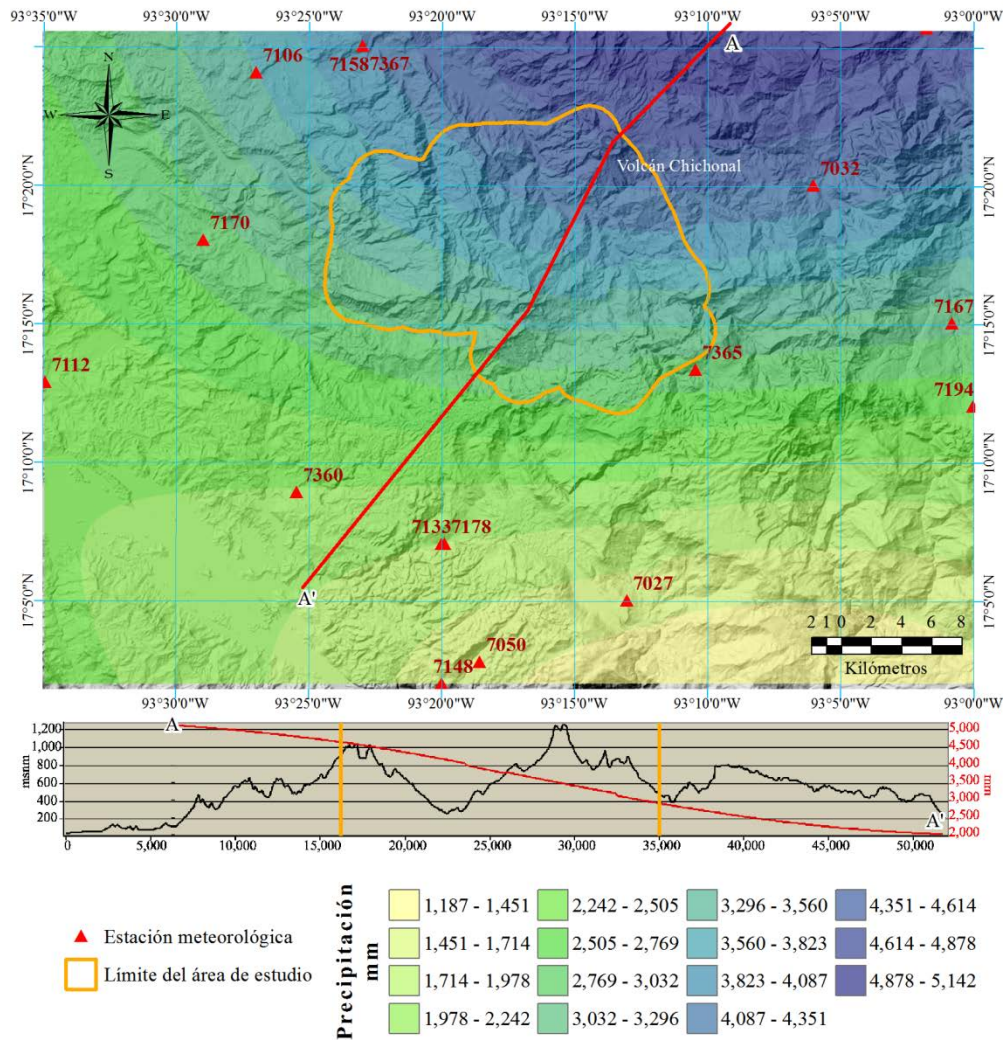


Figura II-5. Mapa de distribución de la precipitación que contienen las estaciones meteorológicas usadas para la interpolación. En la parte de abajo se muestra con línea negra el perfil topográfico y con línea roja el perfil de precipitación.

La estación que mensualmente registró la mayor precipitación promedio fue la 7032 en el mes de septiembre con 556 mm, y la estación con la menor precipitación promedio mensual fue la 7133 con 40 mm en el mes de marzo (Ver anexo y fig. II-5). Todos los datos muestran al área de estudio como una zona de altas precipitaciones (>4,500 mm) y presencia de lluvia todos los meses del año.

Climograma, estación 7365

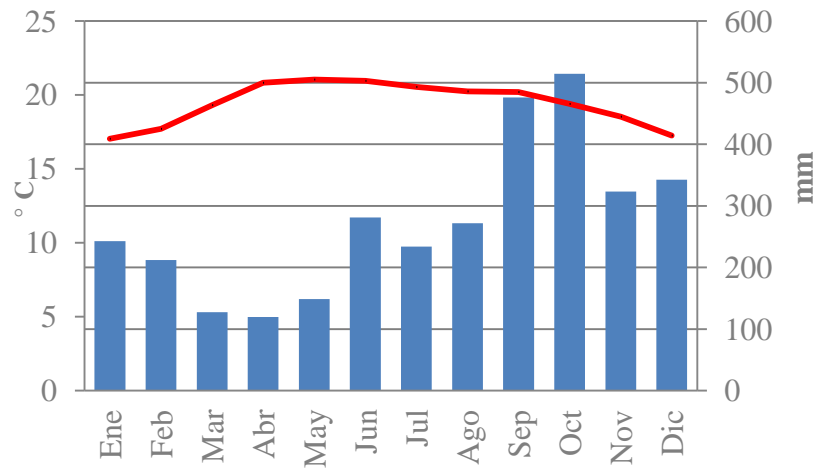


Figura II-6. Climograma correspondiente a la estación 7365 ubicada al Sureste de la zona de estudio (Ver fig. II-5).

HIDROGRAFÍA

El área de estudio se encuentra en la región hidrográfica Grijalava-Usumacinta y en la cuenca Río Grijalva-Villahermosa. Así mismo, comparte superficie con las subcuencas (Fig. II-7): Río Zayula, Río Mezcalapa, Río Tzimbac y P. Netzahual. Se trata de cuencas de forma alargada y de afluentes directos al río Grijalva. En el área de estudio la mayor parte (58%) corresponde a la subcuenca del río Zayula, por su superficie le sigue la cuenca del Río Tzimbac (23%) que corresponde a su parte media, después la subcuenca del río Mezcalapa (16%) en una de sus parte altas, la cual tiene una forma irregular y contiene un segmento del río Grijalva. El afluente de mayor orden en el área de estudio es de 5, de acuerdo a la red hidrográfica de INEGI, orden presente en todas las subcuencas con excepción a la correspondiente al río Netzahualcóyotl.

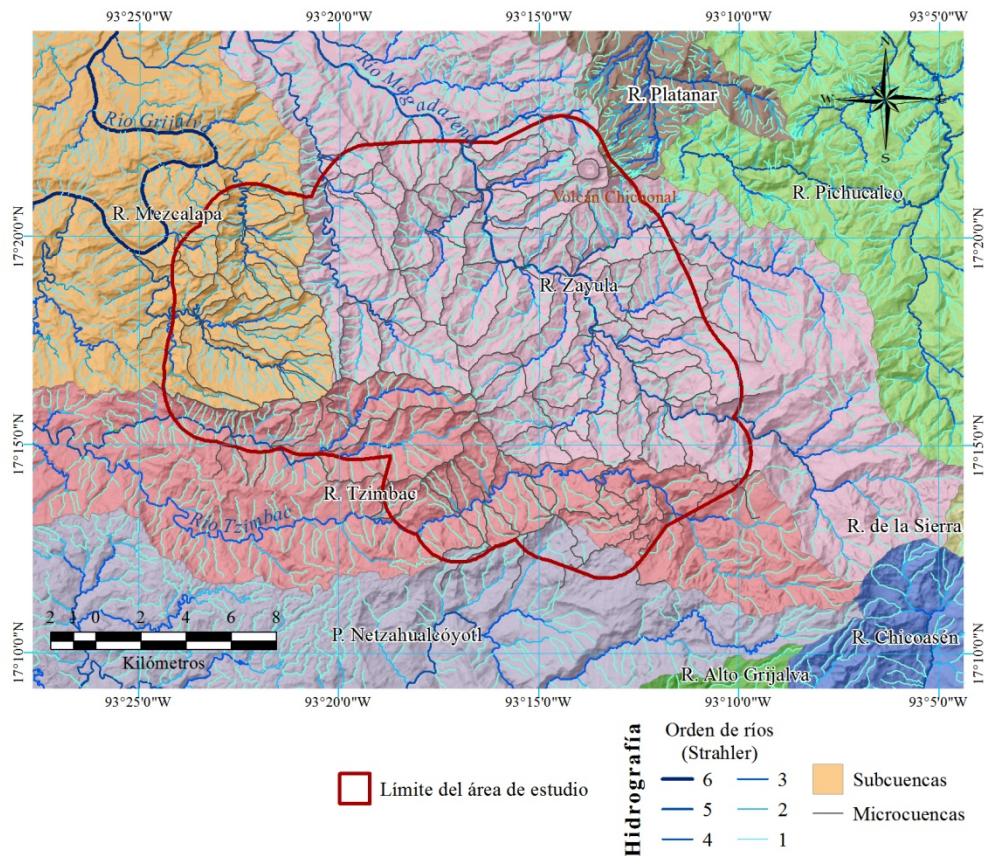


Figura II-7. Mapa de la hidrografía en el área de estudio.

GEOMORFOLOGÍA

El mapa de geomorfología (Fig II-8) fue elaborado con base a cuatro criterios: litología, inclinación de la pendiente, densidad y patrón de drenaje. La litología corresponde al mapa geológico (Fig. II-2), los grados de inclinación de la pendiente se obtuvieron del modelo digital de elevación (MDE) con una resolución espacial de 20 m, producto de la interpolación de curvas de nivel con una equidistancia de 20 m del INEGI. Los grados de inclinación de la pendientes fueron clasificados en cinco rangos basado en Leontiev y Richagov (1988): $< 5^\circ$ categorizado como planicie, 5° - 15° se le dio la categoría de laderas tendidas, de 15° - 35° laderas de pendiente media y $>35^\circ$ con la categoría de laderas abruptas. El tipo de ladera más frecuente resultó ser la ladera de pendiente media (50%), seguida de las laderas tendidas (31%), después las planicies (11%) y finalmente las laderas

abruptas (8%). La densidad de drenaje se clasificó en media, baja y alta conforme al área de estudio. Los patrones de drenaje identificados fueron: Anular, detrítico, radial, enrejado, paralelo y subparalelo, el que más superficie cubre es el drenaje con patrón paralelo (61%), seguido del patrón detrítico (14%), después el patrón subparalelo (11%) con una distribución similar se presentó el patrón enrejado (10%) y el restante (4%) pertenece a los otros dos patrones faltantes. El trazo de drenaje considerado para el análisis fue el de la carta topográfica escala 1:50000 del INEGI. El resultado final dio la identificación de 42 unidades que muestran la diferenciación de geformas presentes dada su litología, pendiente, densidad y sus formas de drenaje. Así también, el mapa de geomorfología (Fig. II-8) presenta el rasgo de crestas, que corresponde a partes altas en pendientes con fuertes inclinaciones y morfologías afiladas, las cuales fueron interpretadas en el MDE. En el área de estudio se identifican estructuras tectónicas como el relieve invertido del sinclinal Maspac y el anticlinal La Unión, otra estructura, pero de origen ígneo extrusivo es el edificio del volcán Chichonal, el cual domina la parte Noreste del área.

Inventario de procesos de remoción en masa

La elaboración del inventario de PRM (Fig. III-2) se hizo con base en fotointerpretación de imágenes aéreas a escala 1:75,000 del año 1984; interpretación de imágenes pancromáticas SPOT 5, para los años 2009 y 2010 con una resolución espacial del pixel de 2.5 m adquiridas de ERMEXS; imágenes SPOT de 2006 consultadas en Google Earth; imágenes Quickbird del 2008 en color verdadero; y recorridos de campo. Se identificaron rasgos morfológicos dejadas por la ocurrencia de PRM, dando como resultado la elaboración de un mapa inventario con 549 PRM identificados (Fig. III-2). Los PRM fueron clasificados de acuerdo a su tipo de movimiento y con base en la clasificación de Varnes (1978), distinguiendo en cada uno el escarpe y el depósito. Así, los cuerpos identificados se agruparon en: flujo de detritos (Fig. II-9A), que es una mezcla de sedimentos y agua donde el movimiento se presenta como un fluido continuo conducido por la gravedad y que

alcanzara gran movilidad en función del aumento de los espacios saturados con agua; estos se presentan en zonas de pendientes con altos grados de inclinación. Deslizamiento rotacional (Fig. II-9B), que son aquéllos cuya superficie de deslizamiento es cóncava y la cabeza del deslizamiento tiene poca inclinación y suele estar a contrapendiente. Deslizamiento traslacional (Fig. II-9C), son aquéllos con superficie de deslizamiento plana, la cual suele ser el contacto entre capas o entre suelo y roca. Caída de detritos y bloques (Fig. II-9D) este movimiento de caída es causado principalmente por el corte de caminos o el socavamiento de ríos en lutitas que presentan una caída continua de material.

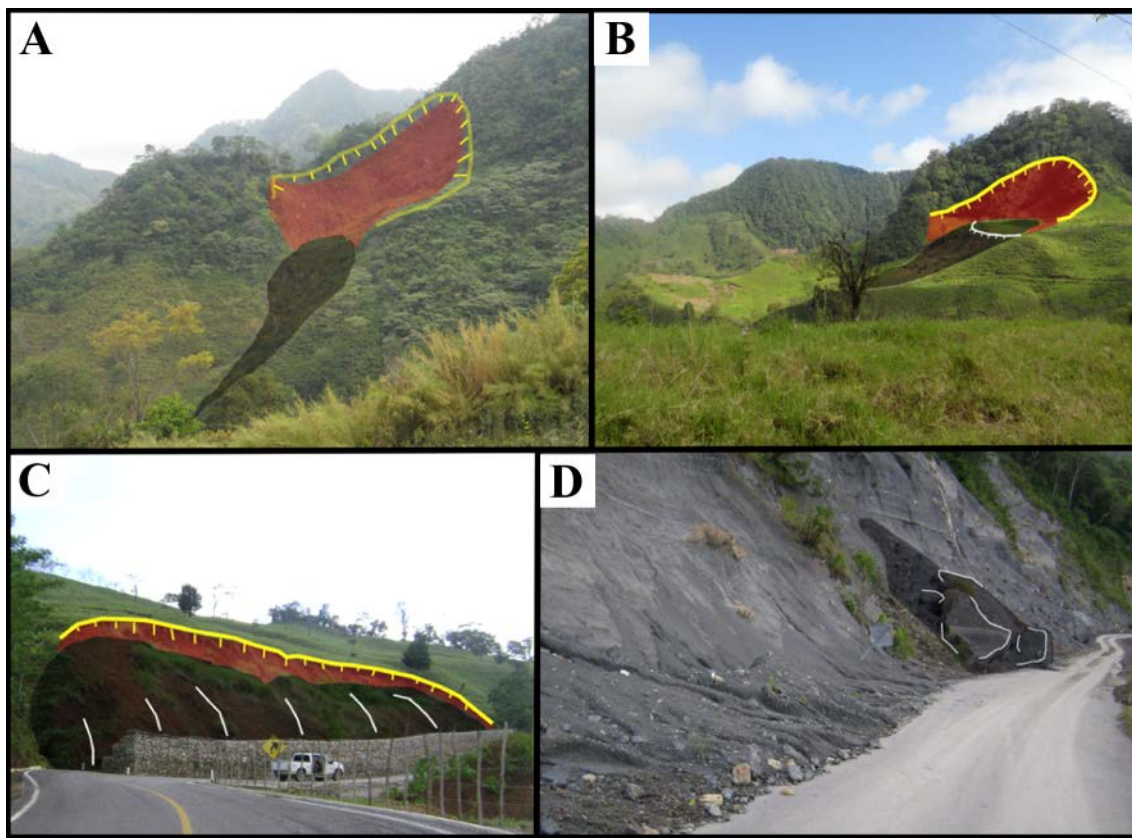


Figura II-9. Imágenes de los tipos de movimientos de procesos de remoción en masa que se presentan en el área de estudio. A) Flujo de detritos, B) Deslizamiento rotacional, C) Deslizamiento traslacional, D) Caída de detritos y bloques.

De acuerdo al inventario realizado el 53 % de los PRM corresponde a flujos de detritos (Tabla II-2), pero apenas representan el 8% de las laderas que han presentado inestabilidad, es decir, son numerosos pero de poca extensión. Los deslizamientos traslacionales

representan el 25% del inventario y son los que mayor (45%) superficie representan. Los deslizamientos rotacionales son apenas el 2.5 % del inventario, pero se trata de grandes masas removidas, siendo su superficie casi el 44% de la superficie total de los PRM. Los PRM que corresponden a caída de detritos y bloques representan el 19% del inventario, los deslizamientos traslacionales representan el 25%, aunque se debe de considerar que su superficie es el 45% de todo el inventario.

Tabla II-2. Proporción de PRM según su movimiento y la superficie afectada

<i>Tipo de movimiento</i>	<i>Cantidad</i>	<i>%</i>	<i>Área (Has)</i>	<i>%</i>
Caída de detritos y bloques	104	18.94	326.18	3.18
Flujo de detritos	292	53.19	812.69	7.93
Deslizamientos rotacionales	14	2.55	4,504.84	43.96
Deslizamientos traslacionales	139	25.32	4,604.94	44.93
Total	549	100	10,248.65	100

COBERTURA VEGETAL

Para obtener la cobertura de vegetación se adquirieron tres escenas de imágenes SPOT 5 por medio de ERMEXS (Estación de Recepción México de la constelación Spot), una escena con fecha de toma de noviembre de 2009 y las otras dos son de marzo de 2010, escenas tanto en pancromático con resolución de 2.5m, como multiespectrales en resolución de 10 m. Las escenas contaban con un nivel de procesamiento 2A, por lo que era necesario que fueran ortorectificadas, en el software PCI. El siguiente paso fue realizar una clasificación supervisada en el software ERDAS, con el fin de hacer uso de un proceso automatizado.

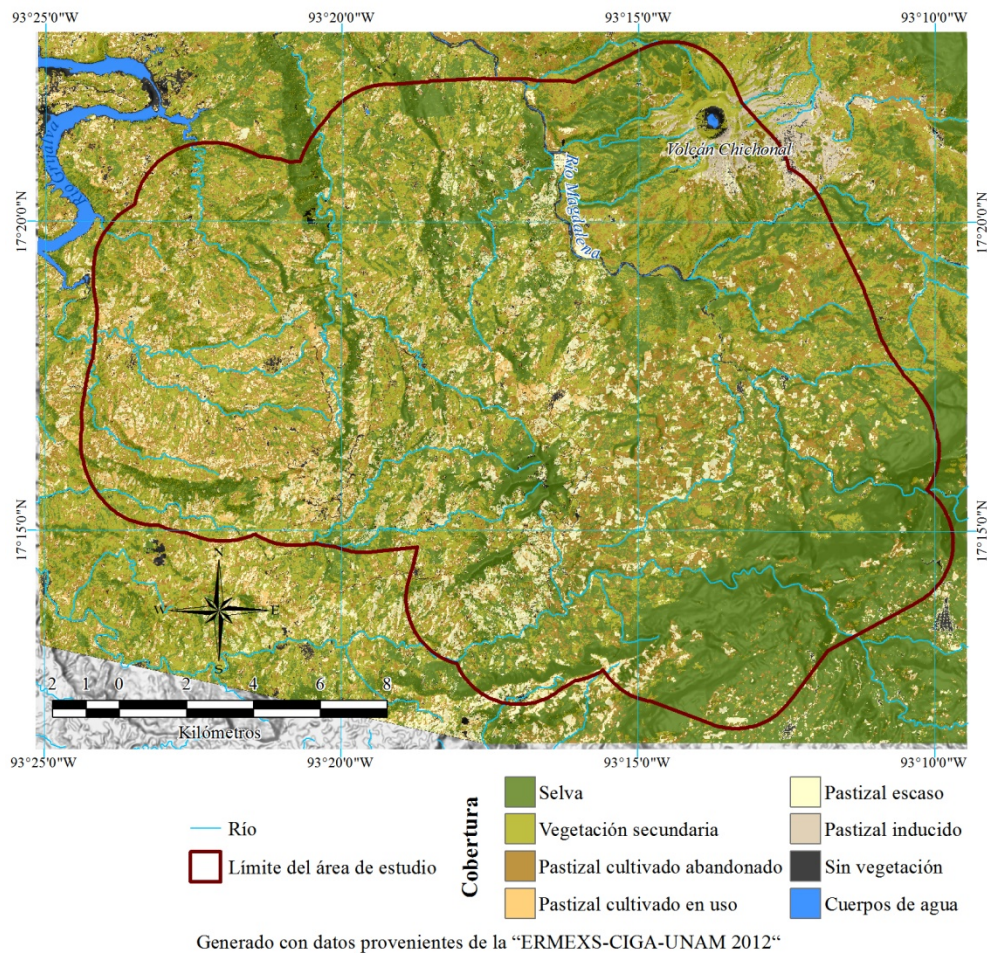


Figura II-10. Mapa de cobertura vegetal resultante del procesamiento de las imágenes SPOT 5 (2009-2010).

El resultado fue la clasificación de siete tipos de cobertura más cuerpos de agua (Fig. II-10). La primera de las clasificaciones es selva (Fig. II-11A) que corresponde a las zonas de mayor densidad de arbolado, no se especifica algún tipo específico de vegetación o comunidad de vegetación. La segunda clase corresponde a la cobertura de vegetación secundaria (Fig. II-11B) y se integra por vegetación herbácea junto con arbustos y la presencia de árboles de manera dispersa; esta cobertura puede indicar zonas que han sido deforestadas recientemente o zonas que presentan un avance en sus procesos de sucesión a un estrato de vegetación mayor. Los pastizales fueron clasificados en tres tipos con base en Rzedowski, (2006) y al estado de uso, por así convenir a los intereses del estudio, dando las clases tercera, cuarta y quinta. Así, la tercera clasificación es conformada por el pastizal

cultivado abandonado (Fig. II-11C) y corresponde a las zonas de pastizales con tallos altos (2 m), lo cual puede indicar que son tierras que no han tenido algún uso durante algún lapso de tiempo. El pastizal cultivado en uso (Fig. II-11D) corresponde a la cuarta clase, y es compuesto por pastos de menor altura que suelen ubicarse en zonas donde el pastoreo es intensivo. En la quinta clase se encuentra la cobertura clasificada como pastizal escaso (Fig. II-11E) y corresponde a las superficies que presentan pobre cobertura vegetal, ya sea resultado de afectaciones antrópicas o por la composición del suelo que lo soporta, como es el caso de los depósitos de las terrazas aluviales en el río Magdalena y en laderas del volcán. En la sexta clase se delimitaron las áreas sin vegetación (Fig. II-11F), estas son tanto el resultado de una alta inclinación de la pendiente, zonas afectas por recientes procesos de remoción en masa o por la eliminación de la vegetación por obras antrópicas, caso de las zonas urbanas y caminos. Por último, en la séptima clase fue necesario hacer la distinción de la cobertura de pastizales del volcán Chichonal ya que su firma espectral no clasificaba con ninguno de las otras coberturas establecidas, esta zona no ha sido recorrida pero el INEGI lo reporta como pastizal inducido.

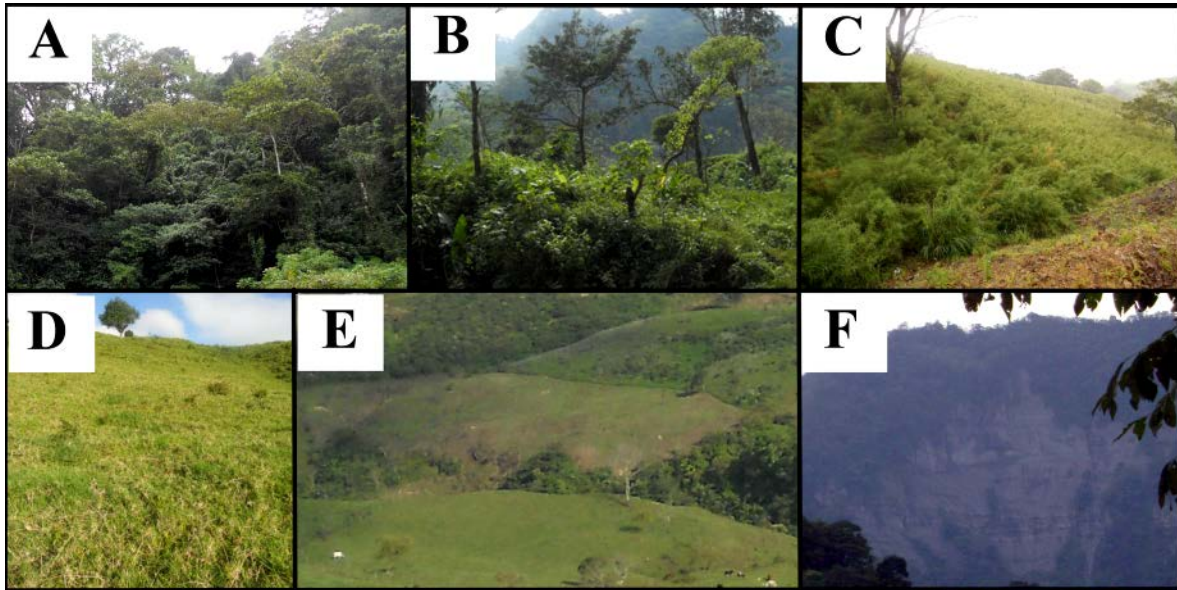


Figura II-11. Imágenes de tipos de coberturas clasificadas. A) Selva, B) Vegetación secundaria, C) Pastizal cultivado abandonado, D) Pastizal cultivado en uso, E) Pastizal escaso y F) Sin vegetación.

Los porcentajes de cada cobertura se indican en la tabla II-3, resaltando que actualmente sólo existe un 39% de superficie con selva, que bajo el supuesto de que si la zona estuvo cubierta en su totalidad por selva, significaría que se ha eliminado cerca del 61% de la cubierta vegetal original; la segunda cobertura con mayor área es la vegetación secundaria con el 28%; tercero pastizal cultivado abandonado con 16%, cuarto con 12 % pastizal escaso y el restante 5% las demás coberturas.

Tabla II-3. Proporciones según tipo de cobertura vegetal

<i>Tipos de cobertura</i>	<i>Área (has)</i>	<i>%</i>
Selva	14,060.39	38.58
Vegetación secundaria	10,130.75	27.80
Pastizal cultivado abandonado	5,835.95	16.01
Pastizal escaso	4,308.20	11.82
Pastizal cultivado en uso	1,176.69	3.23
Sin vegetación	621.16	1.70
Pastizal inducido	278.3	0.76
Cuerpos de agua	34.55	0.09
Total	36,445.99	100

El mapa de cobertura fue evaluado para determinar su grado de fiabilidad, para ello se realizó una matriz de confusión con un muestreo estratificado de 40 puntos por tipo de clase de cobertura. Para obtener el número de muestra se usó la ecuación II-1 (Mass y Counterier, 2011) con los una $p = 0.95$ y una B de 0.05. Los puntos se obtuvieron de manera aleatoria haciendo uso de la extensión Hawth's Tools con aplicación en ArcGIS. Para obtener la verdad de campo se usó una imagen QuickBird del año 2008 cuya resolución de 60 cm en color verdadero que permitió identificar de manera clara la cobertura.

Ecuación II-1:

$$n = \frac{z_{\alpha/2}^2 p(1 - p)}{B^2}$$

n = tamaño de muestra
 α = intervalo de confianza

p = fiabilidad de la muestra

B = medio intervalo de confianza

Los resultados (Tabla II-4) indicaron buenos porcentajes en todos los indicadores donde la fiabilidad global fue del 83%, porcentaje igual a la exactitud del usuario y un 84% para la exactitud del productor.

Tabla II-4. Resultados de la matriz de confusión para evaluar al mapa de cobertura

		<i>Imagen QuickBird</i>										
		Selva	Vegetación secundaria	Pastizal cultivado abandonado	Pastizal cultivado en uso	Pastizal escaso	Pastizal inducido	Sin vegetación	Cuerpos de agua	Total	Error de comisión	Exactitud del usuario
<i>Mapa cobertura</i>	Selva	32	8	0	0	0	0	0	0	40	0.20	0.80
	Vegetación secundaria	1	31	7	1	0	0	0	0	40	0.23	0.78
	Pastizal cultivado abandonado	0	6	32	2	0	0	0	0	40	0.20	0.80
	Pastizal cultivado en uso	0	0	0	39	0	0	1	0	40	0.03	0.98
	Pastizal escaso	0	1	0	6	29	3	1	0	40	0.28	0.73
	Pastizal inducido	0	0	0	2	3	34	1	0	40	0.15	0.85
	Sin vegetación	0	1	0	0	11	0	28	0	40	0.30	0.70
	Cuerpos de agua	1	0	0	0	0	0	0	39	40	0.03	0.98
	Total	34	47	39	50	43	37	31	39	320		
Proporción en el mapa	0.357	0.277	0.180	0.035	0.131	0.003	0.018	0.001	1.00			
Error de omisión	0.06	0.34	0.18	0.22	0.33	0.08	0.10	0.00				
Exactitud productor	0.94	0.66	0.82	0.78	0.67	0.92	0.90	1.00				
Fiabilidad global	0.83											
Exactitud del usuario	0.83											
Exactitud del productor	0.84											

REFERENCIAS

CFE (Comisión Federal de Electricidad), 2008, "II. Geología": Deslizamiento en la Comunidad Juan del Grijalva, Chiapas, México: Estudios para la recanalización del río 2ª Etapa": CFE-Ingeniería civil y ciencias de la tierra.

García, E. - CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad), 1998,. 'Precipitación total anual'. Escala 1: 1000000. México.

- García-Palomo, A., Macías, J. L. , Espíndola, J. M., 2004, Strike-slip faults and K-alkaline volcanism at El Chichón volcano, southeastern Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 136, 247-268.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), 2006, ERIC III-Extractor rápido de información climatológica V.II, CONAGUA
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1982, Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales E1508. Escala 1:250,000. Serie I: Aguascalientes, Aguascalientes., México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2005, Conjunto de Datos Vectoriales de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación, Escala 1:250,000, Serie III (Continuo Nacional) Edición: 1a: Aguascalientes, Ags., México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Leontiev, O. K. y G.I. Richagov, 1988, *Geomorfología General*, Escuela Superior, Moscú.
- Layer, P. W., García-Palomo, A., Jones, D., Macías, J. L., Arce, J. L., Mora, J. C., 2009, El Chichón volcanic complex, Chiapas, México: Stages of evolution based on field mapping and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology: *Geofísica Internacional* 48 (1), 33-54.
- Macías, J. L., Capra, L., Arce, J. L., Espíndola, J. M., García-Palomo, A., Sheridan, M. F., 2008, Hazard map of El Chichón volcano, Chiapas, México: Constraints posed by eruptive history and computer simulations: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, 444-458.
- Macías, J. L., 2005, Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* Tomo LVII, No, 3, 379-424.
- Manea, M., Manea, V. C., 2008, On the origin of El Chichón volcano and subduction of Tehuantepec Ridge: A geodynamical perspective: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 175, 459-471.
- Mass, J. F. y Couturier, S., 2011, Evaluación de base de datos cartográficas. En Bautista Zuñiga, F. (Ed.) *Técnicas de muestreo para manejadores de recursos naturales*, México, 770 p.
- Meneses-Rocha, J.J., 2001, Tectonic evolution of the Ixtapa Graben, an example of a strike-slip basin of southeastern México, implications for regional petroleum systems: En: Bartolini, C., Buffler, R. T., Cantú-Chapa, A. (eds.), *The western Gulf of México*

basin: tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems: Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists, Memoir, 75, 183-216.

Padilla y S, R. J., 2007, Evolución Geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana LIX, 1, 19-42.

Rzedowski, J., 2006, Vegetación de México. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 504 pp.

Varnes, D., 1978, Slope Movement Types and Processes en Schuster, R. and Krizek, R. (Eds.), In Special report 176: Landslide: Analysis and Control, (pp. 11-33). TRB, National Research Council, Washigton D.C.

Yan-bing, T., 2002, Comparison of semivariogram models for Kriging monthly rainfall in eastern China: Journal of Zhejiang University - Science A 3(5), 584-590.

Capítulo III

MODELO ESTADÍSTICO ESPACIAL PARA EL ANÁLISIS MULTIFACTORIAL DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA:

EL CASO DEL MUNICIPIO DE FRANCISCO LEÓN, CHIAPAS

MODELO ESTADÍSTICO ESPACIAL PARA EL ANÁLISIS MULTIFACTORIAL DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA: EL CASO DEL MUNICIPIO DE FRANCISCO LEÓN, CHIAPAS

Jesús Arturo Muñiz Jauregui¹, Luis Miguel Morales Manilla¹, Víctor Manuel Hernández Madrigal², Manuel Eduardo Mendoza Cantú¹, Juan Carlos Mora Chaparro³

¹ *Centro de Investigación en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México*

² *Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.*

³ *Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.*

RESUMEN

La zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa (PRM) es una estrategia que tiempo atrás ha sido utilizada para evaluar el peligro de este fenómeno. Aquí se exploró el uso de un modelo de zonificación con un enfoque diferente e innovador llamado *Spatial Analysis Statistical Model for Shallow Landslides* (SPASTMO-SL) con el interés de contribuir al estudio de los PRM. La metodología se centró en determinar el arreglo espacial de valores resultantes de la interacción de dos tipos de eventos geográficos: factores que condicionan la ruptura de una ladera y la presencia de PRM, los que fueron analizados por sus relaciones espaciales. Se identificó con los estadísticos t de Student, F de Fisher, W de Wilcoxon y D de Kolmogorov-Smirnoff, las relaciones espaciales que mejor explicaron la ocurrencia de PRM y su nivel de relevancia. Finalmente se estableció la función de preferencia para modelar la relación espacial. Este tipo de método se ha utilizado en la evaluación de tierras con fines productivos, por lo que se hizo una adaptación de acuerdo al comportamiento de los PRM. El proceso estadístico se aplicó por unidad de paisaje, unidades construidas con criterios lito-estructural y la existencia o no de cobertura de selva, con el interés encontrar cambios producto de la deforestación. Las relaciones espaciales consideradas en el modelo fueron inclinación de la pendiente, orientación de la ladera, proximidad al talveg, proximidad al parteaguas; coincidencia con

la altitud; proximidad a crestas y proximidad a caminos. Los resultados mostraron que la inclinación de la pendiente, orientación de la ladera y proximidad a crestas fueron las relaciones espaciales más requeridas para modelar. Proximidad a caminos fue la relación que en mayor número de ocasiones obtuvo la ponderación más alta y sólo fue relevante en unidades de paisaje sin cobertura de selva. Las unidades sin cobertura de selva integraron más variables (18) que las unidades con cobertura de selva (10). Los valores de distancia a caminos con mayor probabilidad van de 50 hasta 350 m, para la inclinación de la pendiente los grados de mayor probabilidad estuvieron entre 10° y 25°. Los resultados finales de susceptibilidad mostraron que el 11% de la superficie es de susceptibilidad muy alta, el 21% alta, el 31% media y el 32% baja. Se evaluó comparando los grados de susceptibilidad con los puntos de PRM inventariados, encontrando que el 57% de los puntos correspondió en grados altos y muy altos, el 20% sobre susceptibilidad media y el restante 23% en baja y muy baja. Se concluye que la relación espacial entre los PRM y variables que condicionan la inestabilidad puede explicar la existencia de PRM, por lo es posible modelar la susceptibilidad a PRM con base en los criterios del SPASTMO-SL.

Palabras claves: Procesos de remoción en masa, susceptibilidad, análisis espacial, relaciones espaciales.

ABSTRACT

The zoning of landslide susceptibility is a strategy that has long been used to evaluate the danger of this phenomenon. Here, the use of a model that zones with a different and innovative perspective has been used with the interest of contributing to the study of landslides; Spatial Analysis Statistical Model for Shallow Landslides (SPASTMO-SL). The methodology was focused on determining the spatial distribution of the resulting values of the interaction of two types of geographical events: factors that condition slope failure and the presence of landslides. Then their spatial relations were analyzed. Student's t-distribution, F-distribution, Wilcoxon signed-rank test, and the Kolmogorov-Smirnov test were the statistic methods used to identify the spatial relations that best explain the occurrence of landslides and their level of relevance. Finally, specifying preference

functions were established to model a spatial relation. This type of method has been used as a model to estimate the attractiveness of land; therefore an adaptation was made in accordance with landslide behavior. The statistical process was applied per landscape unit, based on lithological structure and the presence or absence of forest land cover, with a focus on finding changes produced by deforestation. The spatial relations considered in the model were slope inclination and orientation, coincidence in altitude, proximity to thalweg, divide, ridge and roads. Results indicated that slope inclination and orientation, as well as ridge proximity, were the most required spatial relations in order to model. Proximity to roads was the spatial relation with the highest consideration, and was only relevant in non-forest cover units. Said units integrated more variables (18) than forest cover units (10). The values for road proximity with the highest probability range from 50 meters to 350 m, those for slope inclination range from 10° to 25°. The final landslide susceptibility results show that 11% of the surface has a very high rate of susceptibility, 21% high, 31% medium, and 32% low. In the evaluation conducted comparing levels of susceptibility with inventoried landslides points, results indicate that 57% of the points are in the high and very high classification levels, 20% in the medium level, and 23% in the low and very low levels. It is concluded that the spatial relations between landslides and the variables that condition slope instability can explain the landslide existence, therefore it is possible to model landslide susceptibility based on the criteria of SPASTMO-SL.

Keywords: Landslides, susceptibility, environmental impact, spatial analysis, spatial relations

INTRODUCCIÓN

Los Procesos de Remoción en Masa (PRM) son considerados un peligro geológico que frecuentemente afectan vías de comunicación, áreas de producción agrícola y espacios industriales, urbanos y rurales. Es importante identificar y conocer este fenómeno con el fin de disminuir su frecuencia y efectos negativos. Los mapas de susceptibilidad son la herramienta indicada para mejorar el entendimiento de peligros como los PRM, ya que proporcionan una mirada general de dónde y porqué ocurren. Es por ello que el presente

trabajo se desarrolló con el objetivo de zonificar la susceptibilidad a PRM por medio de métodos estadísticos de análisis espacial, modelando el comportamiento de relaciones espaciales entre variables que pueden pronosticar la ocurrencia de PRM, enfoque novedoso que busca contribuir a la modelación y por ende al estudio de la susceptibilidad de los PRM. Se tomó como caso de estudio al municipio de Francisco León, en el estado de Chiapas México, lugar que se ve afectado por la presencia constante de este tipo de peligro.

ANTECEDENTES

La zonificación de la susceptibilidad es la determinación de áreas con diferentes grados de potencialidad para la ocurrencia de PRM (Muñiz-Jauregui y Hernández-Madrigal, 2012). De manera general se identifican tres clases de métodos para la zonificación de la susceptibilidad a PRM: heurístico, determinístico y estadístico. El primero es un método cualitativo cuyo proceso de ponderación de factores de inestabilidad depende en gran medida del conocimiento del autor. El método del análisis determinístico se basa en modelos de estabilidad de ladera para obtener un factor de seguridad con pruebas de medición y evaluación de parámetros geomecánicos (van Westen *et al.*, 2006). Los métodos de análisis estadístico trabajan bajo modelos estocásticos a partir de la relación que existe entre factores y la distribución de los PRM inventariados (Piacentini *et al.*, 2012).

Los métodos estadísticos que tradicionalmente se han aplicado en la zonificación de la susceptibilidad a PRM se dividen en univariantes y multivariantes. Los análisis univariantes combinan cada factor con el mapa inventario de PRM, otorgando pesos basados en la distribución de PRM y el cálculo se realiza para cada clase de los parámetros (van Westen *et al.*, 2003, Ghosha *et al.*, 2011). En el caso del análisis multivariante se establecen unidades morfométricas donde se combina dos poblaciones (presencia/ausencia de PRM) con un grupo de variables que explicarían la aparición de roturas en la ladera, siendo las técnicas más comunes: regresión logística (Rossi *et al.*, 2010, Das *et al.*, 2011, Felicísimo *et al.*, 2012) y análisis discriminante (Carrara *et al.*, 1991, Rossi *et al.*, 2010, He *et al.*, 2012).

Para este trabajo se aplicó un método de análisis estadístico multivariable bajo el enfoque de análisis espacial desarrollado en la rama de la geografía cuantitativa (Murayama y Thapa, 2011), que busca a través de técnicas estadísticas-matemáticas modelar patrones y anomalías resultado de la interacción entre elementos que comparten un mismo espacio geográfico. Esta metodología se basa en Morales (2013) aplicada en la evaluación de tierras de cultivo, con buenos resultados. Existen trabajos que han usado el análisis espacial para evaluar la ocurrencia de PRM (Althuwaynee *et al.*, 2012 Santoso *et al.*, 2011, Qi *et al.*, 2010, Alcántara-Ayala *et al.*, 2006), pero hasta el momento no se ha aplicado el enfoque desarrollado en este trabajo para el estudio de los PRM, enfoque que para establecer la probabilidad se centra en el arreglo espacial de los valores resultado de la interacción de dos tipos de eventos geográficos, es decir, entender la zonificación de la susceptibilidad a los PRM como un patrón espacial consecuencia de las relaciones espaciales entre los PRM y factores que condicionan la inestabilidad en una laderas. Morales (2013), refiere nueve tipos de relaciones espaciales divididas en tres grupos: grupo I, dominancia de las propiedades del espacio, que integra las relaciones de proximidad, orientación y exposición; el grupo II, equilibrio entre las propiedades del espacio y la de los eventos, que integra las relaciones de adyacencia, inclusión y coincidencia. Grupo III, las relaciones donde existe dominancia de las propiedades de los eventos: conectividad, agregación y asociación.

La idea de regionalizar la superficie de estudio en unidades espaciales que compartan características homogéneas de terreno o de paisaje, como parte de un método para zonificar la susceptibilidad a los PRM, tienen como antecedente el trabajo de Carrara (1983) que supone a las subcuencas o la combinación de subcuencas y litologías como “unidades del terreno”, ya que los considera como rasgos morfológicos fundamentales. Las unidades de terreno se han usado como unidad espacial homogénea para calcular la estadística que evalúa la probabilidad de ocurrencia de PRM (Carrara *et al.*, 1995, Rossi *et al.*, 2010), siendo las piezas de un mosaico que muestra diferentes grados de susceptibilidad a PRM, bajo el supuesto que dentro de la unidad de terreno el grado de susceptibilidad será de igual forma homogéneo. Un antecedente más es el trabajo de Castellanos y Van Westen (2008)

basado en unidades de mapeo de terreno (*terrain mapping units*); las cuales consisten en unidades geomorfológicas elaboradas a partir de la fisiografía, litología, morfometría y unidades de suelo. Unidades con las cuales se aplicó el método heurístico otorgando pesos por unidad según criterios de expertos en el tema. Al igual que en el caso anterior, las unidades de mapeo de terreno consideran que toda su superficie tiene el mismo grado de susceptibilidad a PRM, criterio que no se comparte en este trabajo, debido a que dentro de cada unidad se encuentran condiciones diferentes que cambian la respuesta de factores a la inestabilidad.

ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Francisco León (Figura III-1), se ubica en la zona occidental de la Sierra del Norte de Chiapas, entre las coordenadas latitud Norte $17^{\circ}12'00''$ longitud Oeste $93^{\circ}24'30''$ y latitud norte $17^{\circ}22'00''$, longitud Oeste $93^{\circ}10'30''$. La zona de estudio cubre el territorio municipal de Francisco León más una zona ampliada de 2 km a partir del límite municipal lo que corresponde a un área de 36,648 has.

Se eligió al municipio de Francisco León por la frecuente ocurrencia de PRM y por contar con una geología de origen variado. Se encuentra una litología sedimentaria del paleógeno y litología volcánica del cuaternario. En la zona existen estructuras que han dado origen a una morfología particular como es el sinclinal Mazpac, el Anticlinal La Unión y el volcán el Chichonal (García-Palomo *et al.*, 2004, CFE, 2008, Duffield *et al.*, 1984, Macías *et al.*, 2008). Estas particularidades de la zona favorecieron un análisis más rico y amplio.

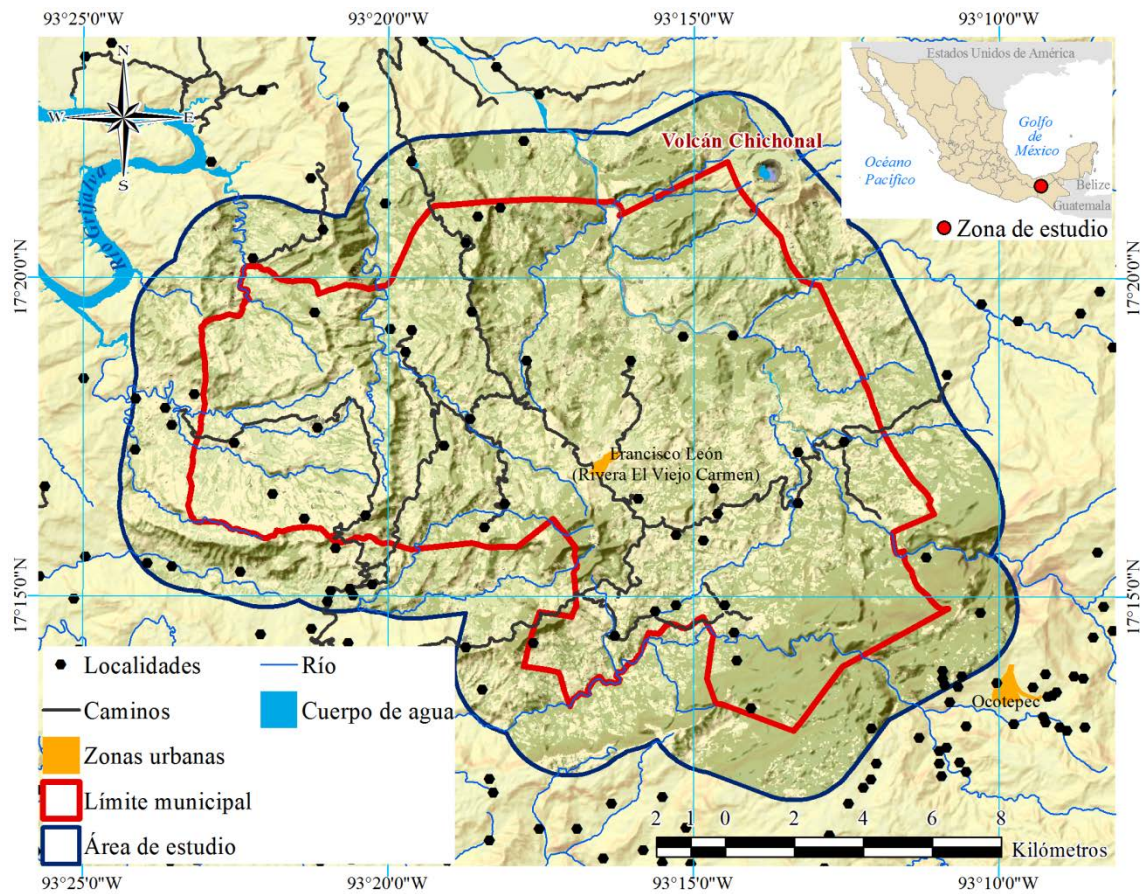


Figura III-1. Zona de estudio. Ir a anexo para ver el mapa a mayor escala.

MATERIALES Y MÉTODOS

El modelo que llamamos *Spatial Analysis Statistical Model for Shallow Landslides* (SPASTMO-SL), basado en el trabajo de Morales (2013), permite zonificar grados de susceptibilidad a PRM superficiales como producto de las interacciones espaciales entre los PRM registrados en un mapa inventario, y los factores que condicionan la inestabilidad de laderas. El modelo general se explica con la siguiente expresión (Ecuación III-1).

$$S_U = \sum_{i=1}^n [WR_i * f(PR_i)] \quad (\text{Ecuación III-1})$$

Donde S_U = susceptibilidad a PRM por unidad de paisaje, WR_i = peso de relación i , $f(PR_i)$ = función de preferencia para la relación i , n = número de relaciones que integran el modelo.

El proceso metodológico para la elaboración del modelo y sus insumos se compone de ocho etapas (Tabla III-1).

1. Elaboración del mapa inventario
2. Elaboración de unidades de paisaje
3. Elaboración de cartografía de relaciones espaciales elegidas
4. Evaluación del nivel de relevancia
5. Búsqueda de la función de preferencia
6. Ponderación de relaciones espaciales
7. Integración de mapas por unidad de paisaje
8. Integración del mapa final

Tabla III-1. Descripción de las etapas metodológicas del modelo SPASTMO-SL

<i>Etapa</i>	<i>Objetivos</i>	<i>Comentarios</i>
1 Elaboración del mapa inventario	<ul style="list-style-type: none"> - Identificar PRM. - Localizar los PRM. - Obtener la distribución espacial de los PRM. 	<ul style="list-style-type: none"> - Se identificaron y registraron 549 PRM superficiales en forma de punto.
2 Elaboración de unidades de paisaje	<ul style="list-style-type: none"> - Obtener unidades heterogéneas que compartan características lito-estructurales (factor principal en la ocurrencia de PRM). - Analizar diferencia de resultados entre superficie con cobertura de selva y sin selva. 	<ul style="list-style-type: none"> - Formadas a partir de unidades lito-estructurales cobertura de selva y no selva.
3 Elaboración de cartografía de relaciones espaciales elegidas	<ul style="list-style-type: none"> - Obtener la cartografía correspondiente a las relaciones espaciales seleccionadas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Relaciones espaciales: <ol style="list-style-type: none"> 1-Inclinación de la pendiente 2-Orientación de la ladera 3-Proximidad al talveg 4-Proximidad al parteaguas 5-Coincidencia con la altitud 6-Proximidad a crestas 7-Proximidad a caminos - Elaboración de cartografía raster (pixel 20m).
4 Evaluación del nivel de relevancia	<ul style="list-style-type: none"> - Comprobar para cada unidad de paisaje que la distribución de los datos reales no fuera resultado de la aleatoriedad - Evaluar el nivel de relevancia de las relaciones espaciales para cada unidad de paisaje. - Selección de variables para cada unidad de paisaje con un $\alpha > 60\%$. 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluación entre distribución de datos reales (PRM) y datos aleatorios con los estadísticos: t de Student, F de Fisher para distribución normal, y pruebas no paramétricas W de Wilcoxon y D de Kolmogorov-Smirnoff. - $\alpha = 60\%$ ($p < 0.4$) - La prueba de t no aplica debido a que las medias siempre serán iguales.
5 Búsqueda de función de preferencia	<ul style="list-style-type: none"> - Buscar la función que modela la preferencia de valores donde ocurren los PRM, para cada relación espacial. 	<ul style="list-style-type: none"> - Agrupación en rangos de frecuencia de valores puntuales resultado de las relaciones espaciales. - Normalización de valores de frecuencia (Conversión a valores de probabilidad). - Uso del software TableCurve 2D para encontrar función de preferencia, eligiendo las funciones con formas simples y con el valor de r^2 ajustado más alto posible.
6 Ponderación de relaciones espaciales	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicar valores de ponderación a la cartografía de las relaciones espaciales seleccionadas usando los valores del estadístico D normalizado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Uso de los valores del estadístico D. - Normalización de valores del estadístico D por unidad de paisaje.
7 Integración de mapas por unidad de paisaje	<ul style="list-style-type: none"> - Elaborar un mapa de susceptibilidad a PRM para cada unidad de paisaje, resultado de la suma de las cartografías ponderadas de las relaciones espaciales. 	<ul style="list-style-type: none"> - Suma de cartografías usando ArcGIS 10.
8 Integración del mapa final	<ul style="list-style-type: none"> - Obtener un solo mapa de susceptibilidad a PRM para toda la zona de estudio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Integración de mapas de susceptibilidad de unidades de paisaje en un solo mosaico usando ArcGIS 10.

La primera etapa, elaboración del mapa inventario, fue resultado de: interpretación de fotografías aéreas escala 1:75,000 del año 1984; interpretación de imágenes SPOT 5 pancromaticas del 2009 y 2010, con una resolución espacial de 2.5 m adquiridas de ERMEXS; interpretación de imágenes SPOT del 2006 de Google Earth y de imágenes Quickbird 2008, con una resolución espacial de 60 cm; y recorridos de campo. En total se inventariaron 569 cuerpos inestables (Fig. III-2), para la zona de estudio.

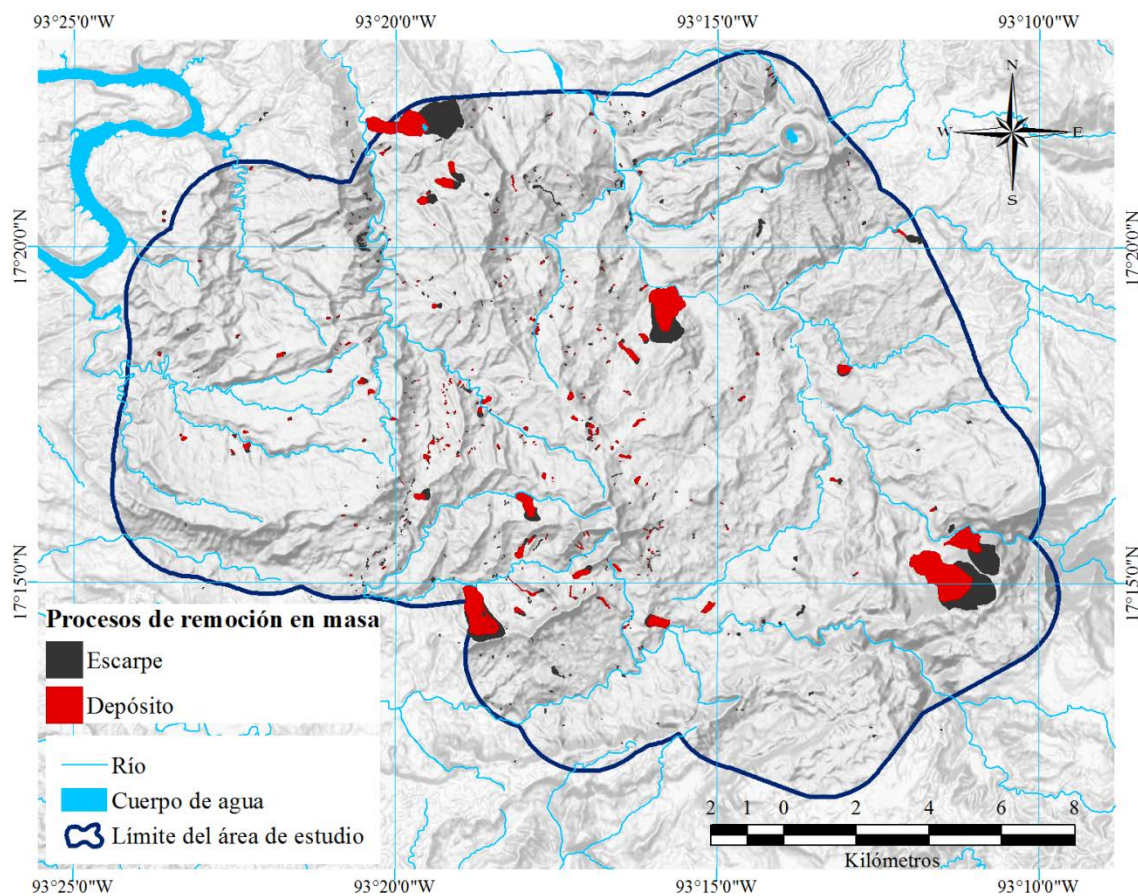


Figura III-2. Mapa inventario para la zona ampliada del municipio de Francisco León, Chiapas. Ir a anexo para ver el mapa a mayor escala.

El inventario se realizó sin discriminar los PRM por tipo, volumen o actividad. Sin embargo, considerando que el objetivo fue modelar sólo PRM superficiales, se realizó una selección. Para elegir sólo a los PRM superficiales se tomó como criterio medir la longitud

de cada cuerpo inventariado de la corona hasta el punto inferior. Se descartaron los PRM con una longitud > 500 m, con la excepción de flujos de detritos. Tal criterio fue tomado con base en la distribución de frecuencias del total de longitudes de los PRM, ya que a partir de la longitud 500 se observaron anomalías notables en la distribución de los datos. Este criterio permitió descartar 20 PRM quedando un total de 549, los que fueron considerados para el análisis espacial de los datos como la variable dependiente.

Posteriormente, se marcó como un punto a los 549 PRM, señalando el inicio del escarpe principal, ya que este es el sitio que representa una mayor inestabilidad. Esto con el propósito de evitar que el análisis espacial fuera influenciado por la superficie del PRM.

En la segunda etapa se elaboraron unidades de paisaje formadas primero a partir de unidades geológico-estructural de la carta geológica E15-8 escala 1:250,000 (INEGI, 1982), y segundo a partir del mapa de cobertura vegetal de elaboración propia. Las unidades tomadas del mapa de geología corresponden a las unidades diferenciadas por su litología y su formación, descartando zonas de aluvión y cuerpo de agua. Se decidió usar estas unidades por la razón que diferenciaban en buena medida un paisaje morfológico lo suficientemente generalizado para garantizar superficies adecuadas para el análisis espacial. El mapa de cobertura vegetal fue clasificado en zonas con cubierta de selva y en zonas sin cubierta de selva que agrupa pastizales, vegetación secundaria y zonas sin cubierta vegetal. El mapa de cobertura (Fig. II-9) es de elaboración propia con base a cuatro escenas de imágenes SPOT, dos escenas de noviembre 2009 y las otras dos de marzo 2010, con una resolución multiespectral de 10 m, con las cuales se hizo una clasificación supervisada y cuya fiabilidad global fue del 83%. En esta etapa, las unidades geológico-estructurales fueron divididas en áreas con selva y sin selva, con el interés de afinar la investigación y poder valorar si influye o no la presencia o ausencia de la cubierta vegetal, es decir evaluar la influencia del factor antropogénico. Ambos criterios, litológico-geomorfológico y cubierta vegetal, dieron forma a las unidades de paisaje como se muestra en la figura III-3 cuyas proporciones se encuentran en la tabla III-2. El hecho de analizar la zona de estudio dividiéndola en unidades de paisaje, surgió de la hipótesis de que la morfología está

controlada por la litología y la estructura geológica, que representan los principales factores que condiciona la ocurrencia de PRM (Ghosha *et al*, 2011, Varnes, 1984).

Tabla III-2. Distribución y proporciones de superficie y cantidad de PRM por Unidad de Paisaje

Clave	Unidad de Paisaje		Superficie		PRM		Cantidad PRM * Proporción de Superficie de Unidad	
			Has	Proporción	Cantidad	Proporción	Neta	Normalizada
I-1	Arenisca-lutita del Oligoceno	No selva	3,913.54	0.107	132	0.240	14.103	0.242
I-2	Arenisca-lutita del Oligoceno	Selva	1,180.50	0.032	31	0.056	0.999	0.017
II-1	Lutita-Arenisca del Eoceno	No selva	4,990.62	0.136	91	0.166	12.399	0.213
II-2	Lutita-Arenisca del Eoceno	Selva	2,383.59	0.065	25	0.046	1.627	0.028
III-1	Lutita-arenisca del Mioceno	No selva	6,342.05	0.173	70	0.128	12.120	0.208
III-2	Lutita-arenisca del Mioceno	Selva	1,108.41	0.030	18	0.033	0.545	0.009
IV-1	Lutita-arenisca del Oligoceno	No selva	3,979.18	0.109	77	0.140	8.365	0.144
IV-2	Lutita-arenisca del Oligoceno	Selva	1,834.89	0.050	17	0.031	0.852	0.015
V-1	Depósito volcánico cuternario de composición intermedia	No selva	3,454.25	0.094	54	0.098	5.092	0.087
V-2	Depósito volcánico cuternario de composición intermedia	Selva	1,960.26	0.054	25	0.046	1.338	0.023
VI-1	Caliza del Oligoceno	No selva	631.34	0.017	1	0.002	0.017	0.000
VI-2	Caliza del Oligoceno	Selva	4,433.87	0.121	6	0.011	0.726	0.012
VII	Aluvial		416.39	0.011	2	0.004	0.023	0.000
	<i>Total</i>		<i>36,628.9</i>	<i>1.00</i>	<i>549</i>	<i>1.00</i>	<i>58.206</i>	<i>1.00</i>

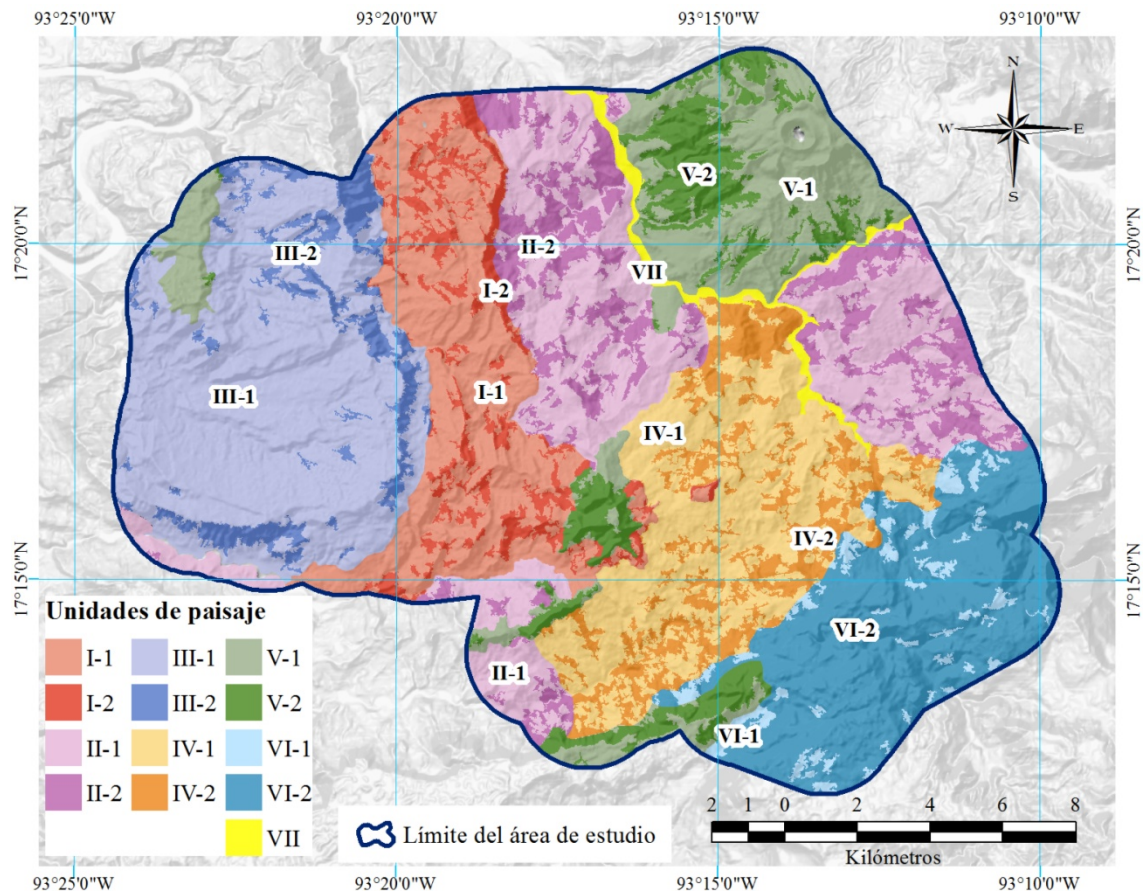


Figura III-3. Mapa de unidades de paisaje para el análisis espacial de la susceptibilidad de los PRM en el municipio de Francisco León Chiapas. Ir a anexo para ver el mapa a mayor escala.

La tercera etapa corresponde a la elaboración de cartografía de las relaciones espaciales seleccionadas que hacen de variables explicativas. Las relaciones espaciales como factores de inestabilidad de una ladera fueron elegidas con base en lo señalado en la bibliografía (García-Ruiz *et al.*, 2010, Wemple *et al.* 2001, Karsli *et al.*, 2009, Knapen *et al.*, 2006, Vanacker *et al.*, 2003, Dhakal *et al.*, 2000, Sidle y Ochiai, 2006, Das, *et al.*, 2010, Dahl, *et al.*, 2013, Ghosha, 2011, Muñoz-Jauregui y Hernández-Madrigal, 2012). Las relaciones espaciales fueron: inclinación de la pendiente medido en grados, como variable obligada para el estudio de los PRM; orientación de la ladera medida en grados, variable usada para considerar niveles de insolación y estructura geológica; proximidad al talveg medida en metros lineales, variable que señala áreas de mayor acumulación de humedad; proximidad al parteaguas medida en metros lineales, variable que indica zonas de mayor erosión;

coincidencia con la altitud medida en metros sobre el nivel del mar (msnm), variable que indica variación de condiciones climáticas y de estructura geológica; proximidad a crestas medida en metros lineales, criterio similar a la proximidad al parteaguas, pero aquí se identifica un rasgo morfológico agreste que el parteaguas no cumple en su totalidad; y proximidad a caminos medida en metros lineales, variable que se observó en campo con una fuerte influencia en los PRM, considerada como una variable que refleja un efecto antrópico directo a la inestabilidad. Para cada una de las variables se hizo un mapa ráster con una resolución de pixel de 20 m.

En el caso de algunas relaciones espaciales se realizó mapas de costos por distancia. Para el mapa de distancia al parteaguas se usó como límite de costo la capa talveg para que la distancia se midiera sólo del parteaguas al talveg. En el mapa de distancia a crestas también se usó la capa de talveg como límite de costo. Finalmente, en el mapa de distancia al talveg se usó la capa de parteaguas para calcular la distancia del talveg teniendo como límite de costo al parteaguas. Los mapas fueron elaborados para toda la zona de estudio, con excepción del mapa de proximidad a caminos para el cual sólo se consideró como área de influencia las cuencas que coinciden con el trazo del camino, teniendo como límite de costo los talveg, esto bajo el precepto que el trazo de un camino es capaz de alterar procesos hidrológicos (Borga *et al.*, 2005; Van Den *et al.*, 2010; Das *et al.*, 2011).

La cuarta etapa correspondió a la evaluación del nivel de relevancia estadística de las variables (relaciones espaciales) elegidas para cada unidad de paisaje. Se buscó comprobar que la distribución de los datos reales no fuera resultado de la aleatoriedad, es decir que los datos respondan a la influencia del fenómeno analizado. Por unidad de paisaje se seleccionó la correspondiente cantidad de puntos de PRM, y a su vez se creó la misma cantidad de puntos aleatorios correspondientes a la superficie por unidad de paisaje. Tanto para los puntos reales de PRM como para los puntos aleatorios, se les asignó los valores resultantes de la cartografías de las relaciones espaciales. La metodología propone evaluar los valores puntuales (distribución real contra distribución aleatoria) aplicando los estadísticos t de Student, F de Fisher cuando la distribución era considerada normal, y las pruebas no paramétricas W de Wilcoxon y D de Kolmogorov-Smirnoff para los casos que no

cumplieron con la normalidad (Ver anexo). Los estadísticos evalúan la concentración de los datos, en el caso de t y W ; y la dispersión de datos para F y D . Como límite de confianza para determinar las relaciones espaciales de relevancia para el modelo (Tabla III-4) se estableció una $\alpha = 60\%$ ($p < 0.4$); es decir, se aceptaron distribuciones reales que son hasta 60% diferentes a la distribución aleatoria. En las unidades VI-1, VI-2 y VII (Tabla III-2) los resultados de la evaluación no fueron confiables por su limitada cantidad de PRM, por lo que se decidió descartar estas unidades del modelo. Se determinó que no puede ser aplicada la prueba de t debido a que se está comparando la media del mismo número de eventos distribuido de diferente manera dividido entre el mismo número de clases (ver anexo), por lo que el resultado siempre fue 1. Los cálculos obtenidos se presentan en la tabla III-3 donde se resalta en negritas las relaciones espaciales dentro del límite de confianza.

Tabla III-3. Resultados de la evaluación estadística de relevancia de las relaciones espaciales para el modelo de susceptibilidad

Unidad de paisaje	Relaciones espaciales	Pruebas paramétricas				Pruebas no paramétricas				α
		t	p de t	F	p de F	W	p de W	D	p de D	
I-1	Orientación de la ladera	0	1	0.306	0.023					0.977
	Proximidad a caminos					276	0.159	0.429	0.042	0.958
	Coincidencia con la altitud					264.5	0.603	0.318	0.216	0.784
	Proximidad a cresta					154	0.754	0.353	0.241	0.759
	Proximidad al talveg					154	0.756	0.235	0.734	0.266
	Inclinación de la pendiente	0	1	1.192	0.738					0.262
	Proximidad a parteaguas	0	1	0.854	0.755					0.245
I-2	Orientación de la ladera	0	1	2.547	0.208					0.792
	Coincidencia con la altitud	0	1	1.540	0.555					0.445
	Proximidad a caminos					28	0.696	0.429	0.559	0.441
	Proximidad al talveg	0	1	1.403	0.644					0.356
	Proximidad a cresta					45.5	0.687	0.333	0.699	0.313
	Proximidad a parteaguas	0	1	1.109	0.887					0.113
	Inclinación de la pendiente	0	1	1.109	0.887					0.113
II-1	Inclinación de la pendiente	0	1	0.612	0.370					0.630
	Proximidad a cresta					109	0.900	0.333	0.379	0.621
	Proximidad a parteaguas					128	0.532	0.333	0.379	0.621
	Proximidad a caminos					89	0.835	0.308	0.570	0.430
	Proximidad al talveg	0	1	0.788	0.662					0.338
	Orientación de la ladera	0	1	0.952	0.928					0.072
	Coincidencia con la altitud	0	1	0.990	0.986					0.014
II-2	Orientación de la ladera	0	1	0.431	0.330					0.670
	Inclinación de la pendiente	0	1	2.299	0.334					0.666
	Coincidencia con la altitud					28.5	0.651	0.429	0.559	0.441
	Proximidad a cresta					24	1	0.429	0.559	0.441
	Proximidad al talveg			1.201	0.830					0.170
	Proximidad a parteaguas	0	1	1.126	0.889					0.111
	Proximidad a caminos	0	1	1.000	1.000					0.000
III-1	Proximidad a caminos					175	0.277	0.588	0.006	0.994
	Proximidad a cresta					130	0.469	0.400	0.182	0.818
	Proximidad a parteaguas					103.5	0.722	0.333	0.379	0.621
	Inclinación de la pendiente					99	0.587	0.333	0.379	0.621
	Orientación de la ladera					117.5	0.851	0.267	0.660	0.340
	Proximidad al talveg					115	0.933	0.267	0.660	0.340
	Coincidencia con la altitud	0	1	1.176	0.765					0.235

Unidad de paisaje	Relaciones espaciales	Pruebas paramétricas				Pruebas no paramétricas				α
		t	p de t	F	p de F	W	p de W	D	p de D	
III-2	Orientación de la ladera	0	1	6.2	0.0668					0.933
	Proximidad a cresta					20	0.789	0.667	0.139	0.861
	Coincidencia con la altitud	0	1	0.92	0.9263					0.074
	Proximidad al talveg	0	1	0.938	0.94529					0.055
	Proximidad a parteaguas	0	1	1	0.99998					0.000
	Inclinación de la pendiente	0	1	1	0.99998					0.000
	Proximidad a caminos	SIN DATOS SUFICIENTES								
IV-1	Proximidad a caminos					147.5	0.125	0.667	0.003	0.997
	Coincidencia con la altitud	0	1	2.45	0.1051					0.895
	Orientación de la ladera	0	1	2.21	0.1496					0.850
	Proximidad a cresta					134	0.381	0.4	0.182	0.818
	Inclinación de la pendiente					107	0.834	0.333	0.379	0.621
	Proximidad a parteaguas	0	1	1.551	0.42146					0.579
	Proximidad al talveg					118.5	0.8181	0.8181	0.9251	0.075
IV-2	Coincidencia con la altitud	0	1	0.275	0.183					0.817
	Inclinación de la pendiente	0	1	0.326	0.244					0.756
	Proximidad a cresta	0	1	0.368	0.297					0.703
	Orientación de la ladera	0.3	0.765	1.524	0.655					0.345
	Proximidad a parteaguas	0	1	0.917	0.869					0.131
	Proximidad al talveg					21	0.685	0.333	0.893	0.107
	Proximidad a caminos	SIN DATOS SUFICIENTES								
V-1	Proximidad a caminos					25.5	0.241	0.667	0.139	0.861
	Orientación de la ladera	0	1	0.580	0.403					0.597
	Coincidencia con la altitud	0	1	0.657	0.518					0.482
	Proximidad al talveg	0	1	0.837	0.783					0.217
	Proximidad a cresta					63.5	0.868	0.273	0.808	0.192
	Proximidad a parteaguas	0	1	0.938	0.92096					0.079
	Inclinación de la pendiente	0	1	1.033	0.9603					0.040
V-2	Proximidad al talveg	0	1	12.1	0.016					0.984
	Inclinación de la pendiente	0	1	0.264	0.170					0.830
	Proximidad a parteaguas	0	1	0.587	0.574					0.426
	Coincidencia con la altitud	0	1	1.384	0.730					0.270
	Orientación de la ladera					19	0.935	0.333	0.893	0.107
	Proximidad a cresta					17	0.935	0.333	0.893	0.107
	Proximidad a caminos	SIN DATOS SUFICIENTES								

Tabla III-4. Relaciones espaciales que resultaron relevantes por unidad de paisaje y pesos asignados

<i>Unidad de paisaje</i>	<i>Relaciones espaciales</i>	<i>Estadístico D</i>	<i>Probabilidad</i>
I-1	Proximidad a caminos	0.429	0.307
	Proximidad a cresta	0.353	0.253
	Coincidencia con la altitud	0.318	0.228
	Orientación de la ladera	0.294	0.211
II-1	Inclinación de la pendiente	0.333	0.333
	Proximidad a cresta	0.333	0.333
	Proximidad a parteaguas	0.333	0.333
III-1	Proximidad a caminos	0.588	0.355
	Proximidad a cresta	0.400	0.242
	Proximidad a parteaguas	0.333	0.201
	Inclinación de la pendiente	0.333	0.201
IV-1	Proximidad a caminos	0.667	0.345
	Proximidad a cresta	0.4	0.207
	Inclinación de la pendiente	0.333	0.172
	Coincidencia con la altitud	0.267	0.138
	Orientación de la ladera	0.267	0.138
V-1	Proximidad a caminos	0.667	0.710
	Orientación de la ladera	0.273	0.290
II-2	Inclinación de la pendiente	0.571	0.571
	Orientación de la ladera	0.429	0.429
V-2	Proximidad al talveg	0.667	0.667
	Inclinación de la pendiente	0.333	0.333
I-2	Orientación de la ladera	0.444	1
IV-2	Coincidencia con la altitud	0.500	0.600
	Inclinación de la pendiente	0.333	0.400
III-2	Orientación de la ladera	0.5	0.429
	Proximidad a cresta	0.667	0.571

En la quinta etapa se buscó la función de preferencia para cada relación espacial, en otras palabras, se buscó la función que modelara la preferencia de valores donde ocurren los PRM. Es este paso, la contribución principal del método, fue la de encontrar la distribución espacial de las probabilidades para cada variable explicativa. Para ello, primero se agruparon los valores en intervalos de frecuencia, valores que posteriormente fueron normalizados conforme al método del valor máximo para transformar así los valores de frecuencia en valores de probabilidad quedando el valor máximo como uno. Todo esto bajo el supuesto que cuanto mayor es la frecuencia de valores de una distribución, mayores serán las condiciones de susceptibilidad a los PRM. Con los valores de frecuencia transformados como una distribución de probabilidad, se usó el Software TableCurve 2D para determinar la función que mejor describiera la distribución (Fig. III-4), eligiendo las funciones con formas simples y con el valor de r^2 ajustado más alto posible. Las funciones encontradas fueron calculadas usando ArcGis 10 dando como resultado mapas de probabilidad para cada relación espacial. Para el caso de la relación espacial de orientación de la pendiente debido a su característica de ser una medida circular y que en realidad no se trata de una medida escalar, sino que es una posición, conlleva problemas al representarlo como función. Debido a esto se decidió agrupar los intervalos de frecuencia cada 45° realizando el mismo procedimiento de normalización y tomar directamente esos valores como probabilidad y aplicados a un mapa clasificado con rangos de 45° (Fig. III-5).

La sexta etapa correspondió a la ponderación de relaciones espaciales. De acuerdo a la ecuación III-1 las funciones de preferencia tienen que ser ponderadas con un peso que señale el nivel de influencia de la relación espacial en la incidencia de los PRM, para ello se utilizó el valor del estadístico D de Kolmogorov-Smirnoff, el cual mide (ver anexo) la diferencia máxima entre dos distribuciones acumuladas (real y aleatoria), por lo que puede ser usado como indicador del grado de influencia de cada relación espacial representativa sólo para cada unidad de paisaje (Tabla III-4). Los valores de estadístico D fueron normalizados para que su suma diera el valor de 1, teniendo como resultado el valor de probabilidad aplicado en la modelación.

En la séptima etapa se realizó la integración de mapas por unidad de paisaje, resultado de la suma de los mapas ponderados para cada relación espacial. Obteniendo un mapa de susceptibilidad para cada unidad de paisaje.

En la octava y última etapa se realizó la integración del mapa final por medio de la herramienta de mosaico, privilegiando el valor máximo para los casos de traslape.

RESULTADOS

El proceso de elaboración del mapa de susceptibilidad arrojó resultados relevantes en el rol que las relaciones espaciales representaron para cada unidad de paisaje (Tabla III-5). La inclinación de la pendiente, orientación de la ladera y proximidad a crestas fueron las relaciones espaciales más requeridas para modelar, con seis ocasiones cada una; sin embargo, la proximidad a caminos fue la relación que en mayor número de ocasiones (4) obtuvo la ponderación más alta (Tabla III-4), que fueron las cuatro veces que se utilizó en el modelado. También la orientación de la ladera y la inclinación de la pendiente tuvieron ponderaciones altas. En lo que respecta a la proximidad a caminos, únicamente fue relevante en las unidades de paisaje sin selva, con excepción de la unidad II-1.

Para las unidades con cobertura de selva; la orientación de la ladera se aplicó más veces (3), junto con la inclinación de la pendiente (3) y la proximidad a cresta (2). En contraposición, en las unidades sin cobertura de selva las variables más usadas fueron la proximidad a caminos y la proximidad a cresta, con cuatro ocasiones cada una. Se presentaron casos donde no hay diferencia si existe o no selva; caso ocurrido para inclinación de la pendiente en las unidades de paisaje II (lu-ar) y IV (lu-ar), en la orientación de la ladera no hay diferencia en las unidades I (ar-lu), en la proximidad de cresta se presentó en las unidades III (lu-ar) y IV (lu-ar) y en coincidencia con la altitud en las unidades IV (lu-ar). La unidad de paisaje que integró el mayor número de variables (5) fue la IV-1, siendo además la unidad que más variables comparte (3) con la unidad con de cobertura de selva (IV-2).

Es de resaltar que la inclinación de la pendiente no fue relevante en las unidades de arenisca-lutita. Las unidades de paisaje que presentaron la mayor diferencia entre cobertura

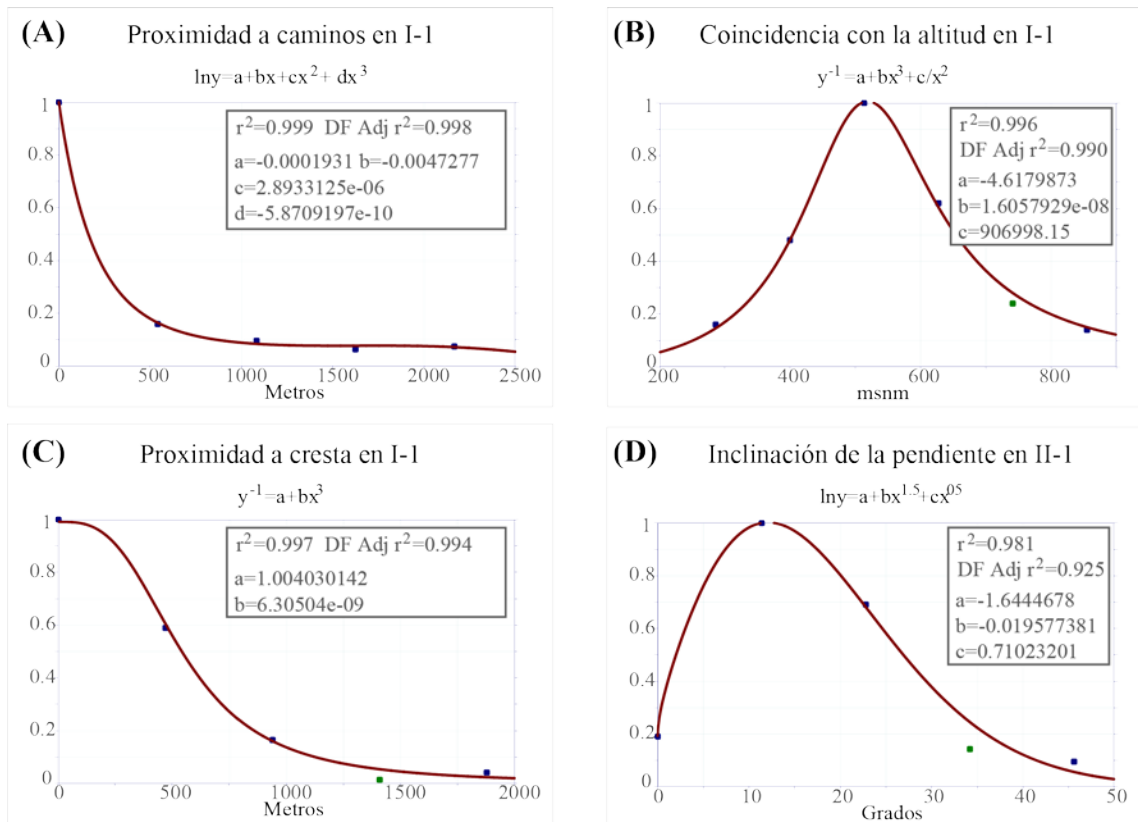
de selva y no selva son las V (Ige), al ser las únicas que no repiten ni una vez la relación espacial que determinó la inestabilidad. La relación espacial menos usada fue proximidad al talveg, que sólo resultó relevante en la unidad V-2, donde cabe observar que más que señalar la influencia de la cercanía al río, señala un rasgo morfológico, es decir, las barrancas en las laderas del volcán Chichonal. Finalmente, las unidades sin cobertura de selva integraron más variables (18) que las unidades con cobertura de selva (10).

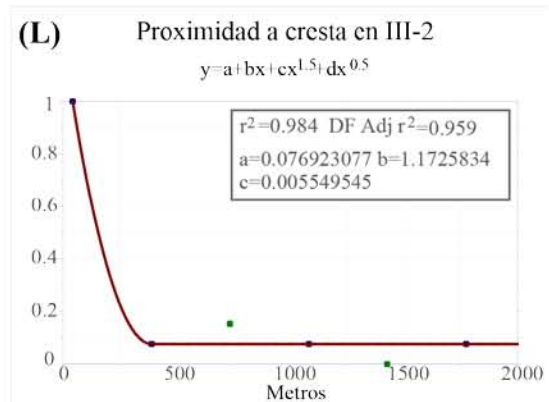
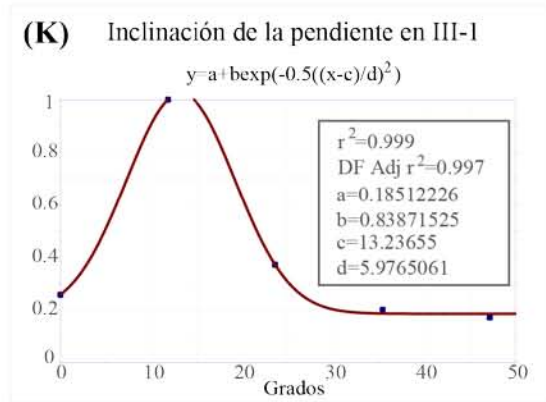
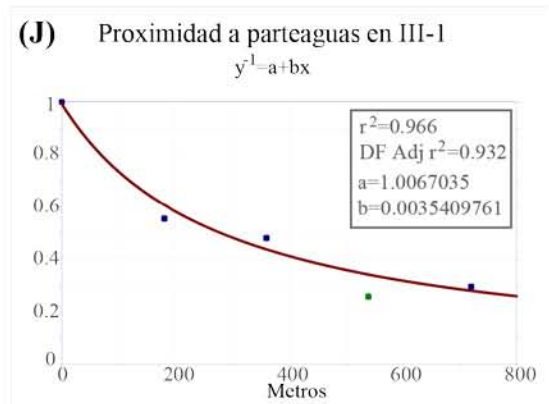
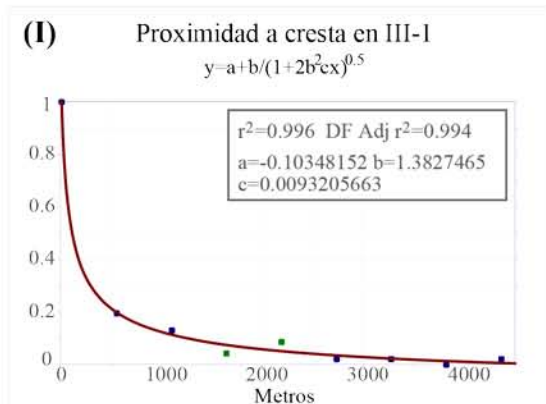
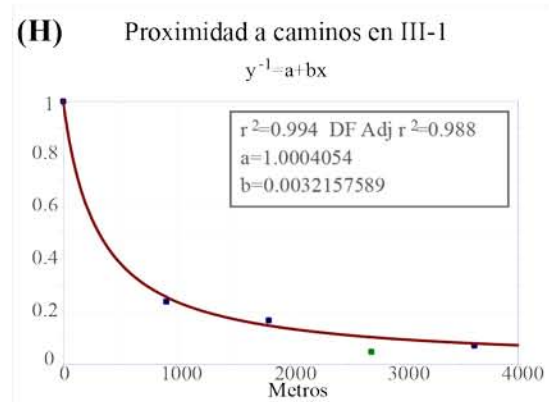
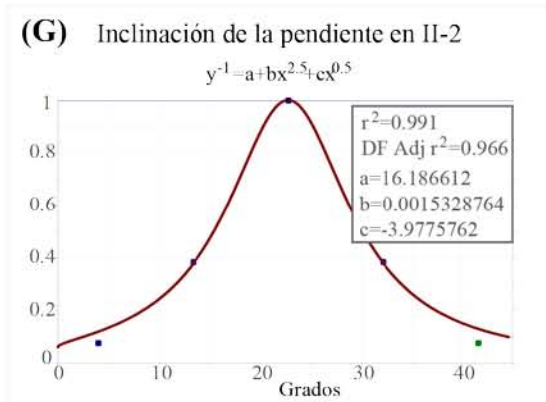
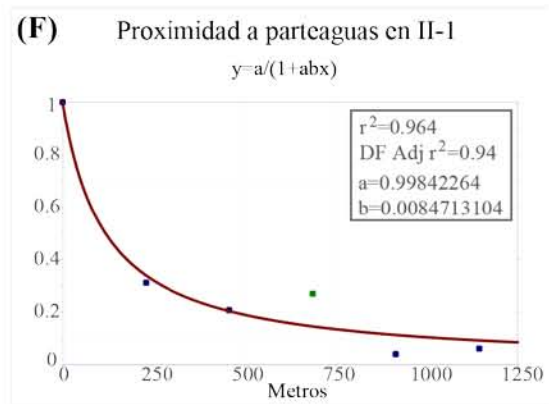
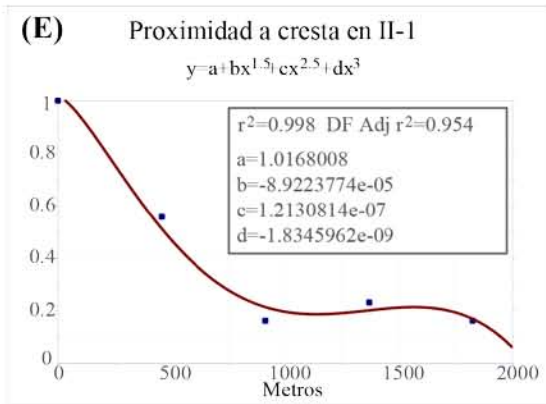
Tabla III-5. Tabla resumen de las relaciones espaciales relevantes incorporadas al modelo de susceptibilidad para cada unidad de paisaje

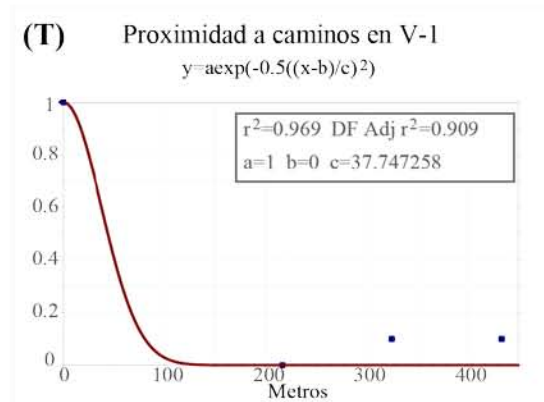
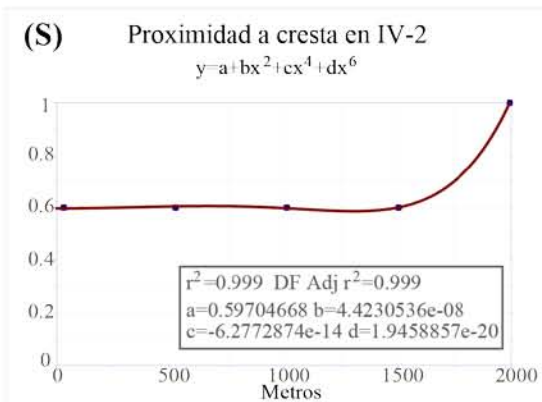
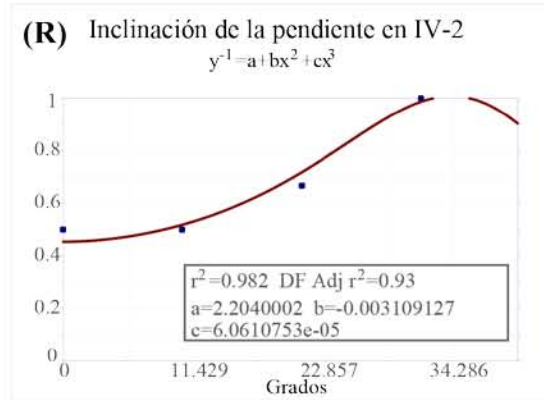
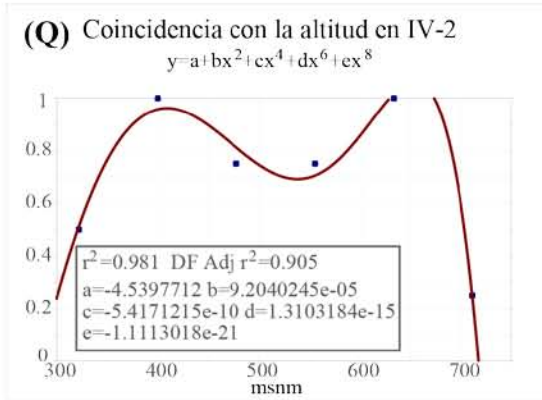
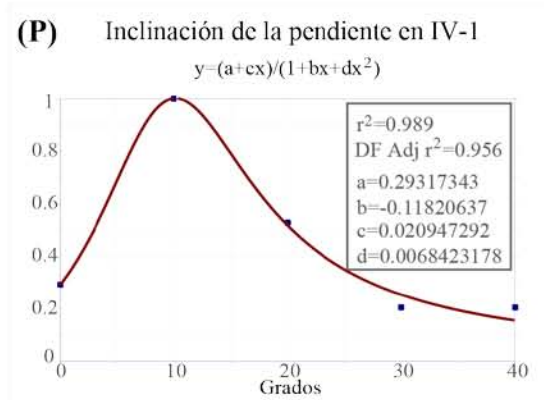
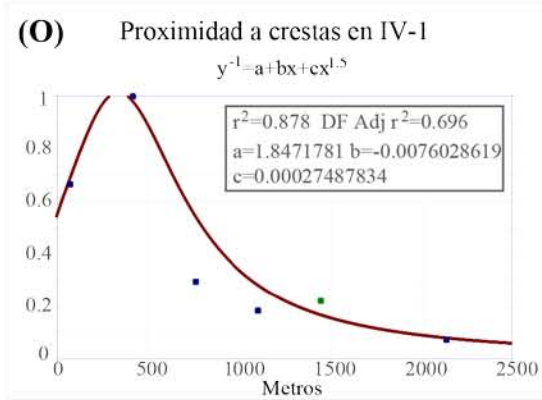
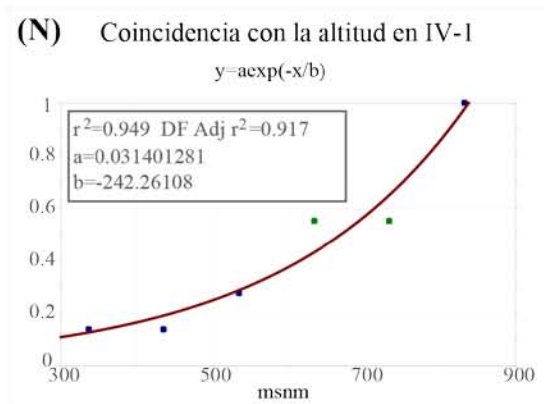
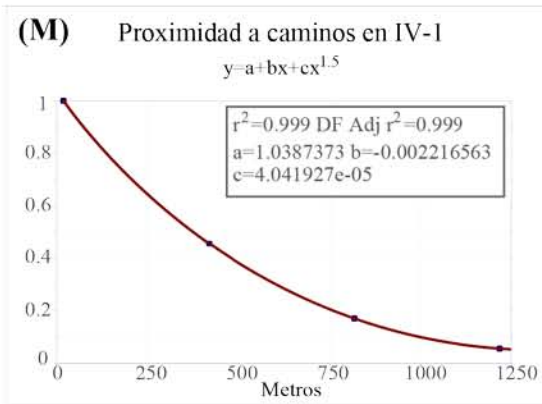
Unidad		Inclinación de la pendiente		Orientación de la ladera		Proximidad a parteaguas		Proximidad a cresta		Coincidencia con la altitud		Proximidad al talveg		Proximidad a caminos		Totales			
		No selva	Selva	No selva	Selva	No selva	Selva	No selva	Selva	No selva	Selva	No selva	Selva	No selva	Selva	No selva	Selva	Total	
I	To (Ar-lu)			X	X			X		X					X		4	1	5
II	Te (Lu-ar)	X	X		X	X		X									3	2	5
III	Tm (lu-ar)	X			X	X		X	X						X		4	2	6
IV	To (lu-ar)	X	X	X				X	X	X	X				X		5	3	8
V	Ige		X	X									X	X			2	2	4
<i>Total</i>		3	3	3	3	2	0	4	2	2	1	0	1	4	0	18	10	28	

El comportamiento de las funciones de preferencia (Fig. III-4) resultaron comportamientos tanto esperados como no esperados: en proximidad de caminos la tendencia es descendiente conforme se aleja del camino, cuya curva de probabilidad baja rápidamente al alejarse del camino (Figs. III-4 A, H, T), con excepción de la unidad IV-1 con un descenso más suave de la pendiente de la curva (Fig. III-4 M), tomando los valores de distancia que representan una probabilidad mayor al 0.5, los valores para las unidades: I-1, III-1, y IV-1 oscilan de los 200 a los 350 m y para la unidad V-1 la distancia es menor a los 50 m. En el caso de inclinación de la pendiente los valores con mayor probabilidad fueron bajos (entre 10° y 25°) en las unidades II-2, III-1 y IV-1 (Fig. III-4 G, K, P). Las unidades IV-2 y V-2 tienen valores de mayor probabilidad que oscilan entre los 30° y los 37° de inclinación (Figs. III-4 R, U). En el caso de la proximidad a la cresta, la curva de probabilidad descende conforme

se aleja de la cresta de manera moderada en las unidades I-1 y II-1 (Figs. III-4 C, E); mientras que en las unidades III-1, III, 2 y IV-1 (Figs. III-4 I, L, O) dicho descenso es más abrupto; para esta misma relación en la unidad IV-2 el comportamiento de la curva es contraria a las anteriores, es decir, es ascendente conforme se aleja de la cresta (Fig. III-4 S), los valores de distancia que están por arriba de 0.5 de probabilidad indican un máximo de 500 m en las unidades I-1 y II-1, 750 m en la unidad IV-1, 1 y entre 100 y 200 m en las unidades III-1 y III-2. En el caso de la coincidencia con la altitud el comportamiento de la curva es distinto entre unidades de paisaje que probablemente puede ser explicado por la morfología de cada una de ellas (Figura III-4 B, N, Q).







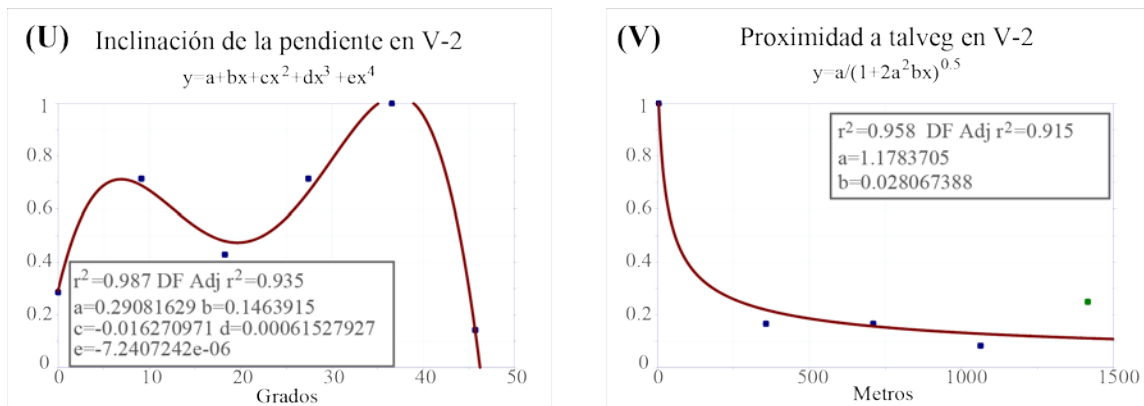


Figura III-4. Gráficas y funciones de preferencia para cada relación espacial. El eje de las ordenadas corresponde los valores de probabilidad.

En el caso particular de orientación de la ladera con la cual se hizo un tratamiento distinto para la tendencia de la probabilidad, los resultados se presentan en graficas (Fig. III-5) que permiten mostrar la tendencia para esta relación espacial. En las unidades I-1 y I-2 (Figs. III-5 A, B) indican sentidos preferenciales contradictorios, siendo que se trata de la misma lito-estructura, sin embargo es la morfología la que ayuda a la conservación de la cobertura de vegetación en los escarpes orientados al Noroeste. Al observar la orientación con mayor probabilidad de las cuatro unidades I-1, I-2, III-2 y IV-1 (Figs. III-5 A, B, C, D) se presentó una tendencia hacia el Este y Noreste, con la excepción de la unidad I-1 que la tendencia es hacia el Suroeste.

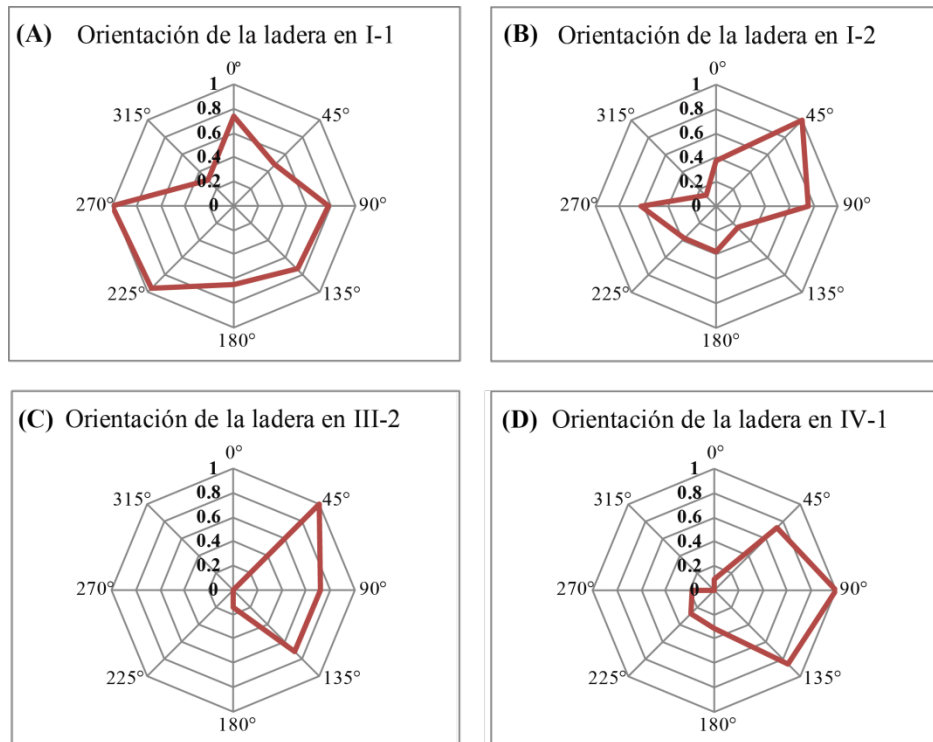


Figura III-5. Gráficas de la distribución de probabilidad para el caso de Orientación de la ladera.

El resultado que corresponde al modelo final de susceptibilidad a PRM se muestra en la figura III-6. Los niveles de susceptibilidad fueron agrupados basados en el método de k-medias, grupos que fueron clasificados en: muy baja, baja, media, alta y muy alta (Tabla III-6), resultando que el 11% de la superficie es de susceptibilidad muy alta, el 21% alta, el 31% media y el 32% baja.

Tabla III-6. Proporciones de los grados de susceptibilidad resultado de la modelación

<i>Susceptibilidad</i>	<i>Superficie (has)</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy baja	1,709	5%
Baja	11,303	32%
Media	11,207	31%
Alta	7,505	21%
Muy alta	4,036	11%
<i>Total</i>	<i>35,760</i>	<i>100%</i>

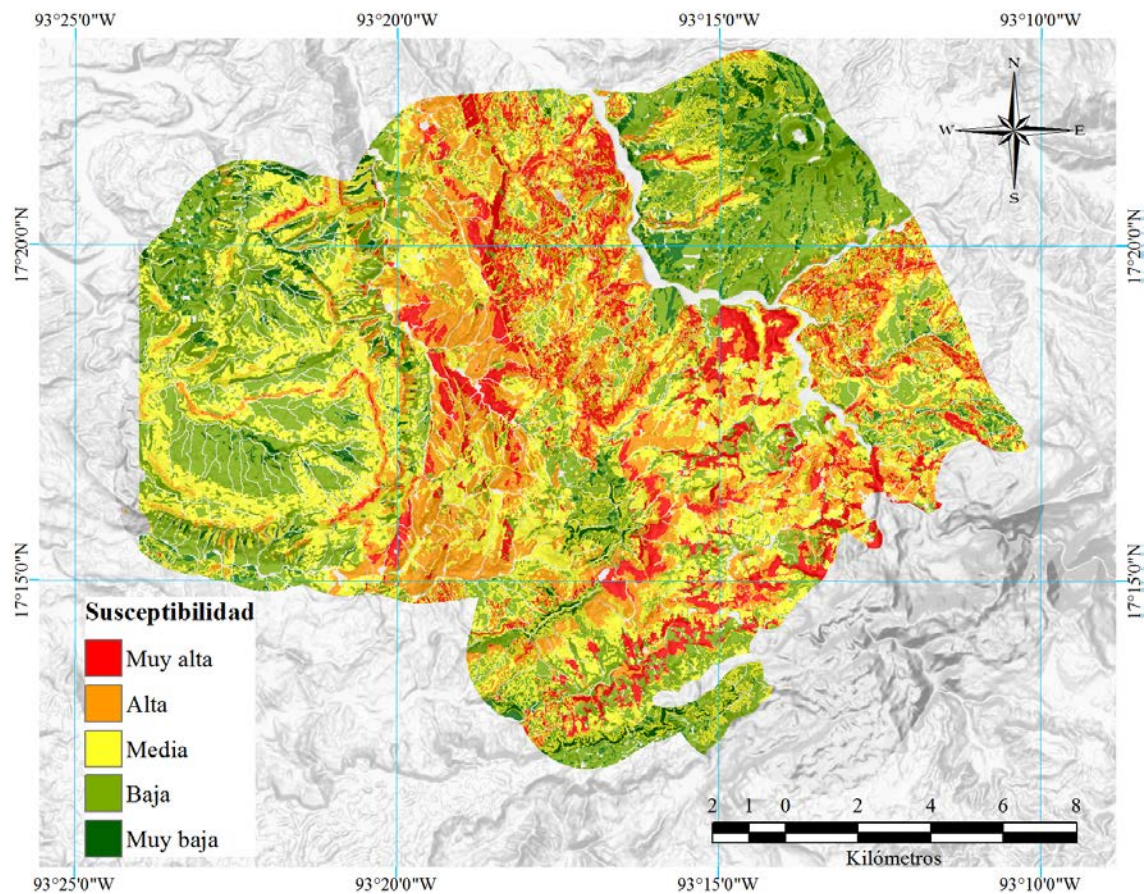


Figura III-6. Mapa de susceptibilidad a PRM resultante. Ir a anexo para ver el mapa a mayor escala.

Evaluación del método

Con el fin de evaluar el resultado se utilizaron 540 puntos del mapa inventario que representan los sitios donde ya ocurrió un PRM y se comparó el resultado de la modelación (Fig. III-7). El resultado esperando fue que los puntos se encontraran sobre grados de alta y muy alta susceptibilidad (Tabla III-7). Para toda la superficie modelada, el 57% de los puntos correspondió a la susceptibilidad esperada, es decir, mayor de un grado alto; mientras tanto, el 20% se encontró dentro de zonas clasificadas con susceptibilidad media y el restante 23% se clasificaron como baja y muy baja. La evaluación de cada unidad de paisaje (Tabla III-7) indica que son las unidades III-1 y V-1 las que tienen un porcentaje alto de puntos en grado bajo de 44% y 67% respectivamente, en el caso de la unidad V-1 el 15% de los puntos están en grados de susceptibilidad muy baja.

Tabla III-7. Comparación de los grados de susceptibilidad y la distribución de los PRM del mapa inventario

<i>Unidad de paisaje</i>	<i>Sin datos</i>	<i>Muy Baja</i>		<i>Baja</i>		<i>Media</i>		<i>Alta</i>		<i>Muy alta</i>		<i>Total</i>
		<i>PRM</i>	<i>%</i>	<i>PRM</i>	<i>%</i>	<i>PRM</i>	<i>%</i>	<i>PRM</i>	<i>%</i>	<i>PRM</i>	<i>%</i>	
I-1	0	0	0.00%	7	5.30%	24	18.18%	59	44.70%	42	31.82%	132
I-2	0	0	0.00%	5	16.13%	6	19.35%	7	22.58%	13	41.94%	31
II-1	0	3	3.30%	7	7.69%	30	32.97%	30	32.97%	21	23.08%	91
II-2	0	0	0.00%	0	0.00%	4	16.00%	14	56.00%	7	28.00%	25
III-1	0	0	0.00%	31	44.29%	18	25.71%	14	20.00%	7	10.00%	70
III-2	0	1	5.56%	0	0.00%	7	38.89%	10	55.56%	0	0.00%	18
IV-1	0	0	0.00%	14	18.18%	14	18.18%	13	16.88%	36	46.75%	77
IV-2	0	0	0.00%	1	5.88%	0	0.00%	3	17.65%	13	76.47%	17
V-1	0	8	14.81%	36	66.67%	3	5.56%	4	7.41%	3	5.56%	54
V-2	0	3	12.00%	7	28.00%	5	20.00%	5	20.00%	5	20.00%	25
VI-1	1	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	1
VI-2	6	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	6
VII	2	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	0	0.00%	2
<i>Total</i>	<i>9</i>	<i>15</i>	<i>2.78%</i>	<i>108</i>	<i>20.00%</i>	<i>111</i>	<i>20.56%</i>	<i>159</i>	<i>29.44%</i>	<i>147</i>	<i>27.22%</i>	<i>549</i>

Otra unidad con problemas de clasificación es V-2, lo que indica que las unidades correspondientes a la geología Ige (unidades V 1 y 2) presentaron resultados que no pueden ser satisfactorios. Es probable que esto sea debido a dos factores, a la mala clasificación de la cubierta vegetal que si bien no es selva, el pastizal y matorral que lo cubre, si es vegetación natural y a la disgregación de las unidades de Ige en el área de estudio lo que pudo afectar al análisis estadístico. La unidad III-1, de igual forma, no presentó buenos resultados, lo puntos en los grados de alta a muy alta representan apenas el 30%. En el resto de las unidades, el porcentaje de susceptibilidad alta y muy alta susceptibilidad se encuentra por arriba del 56%, siendo la unidad IV-2 la que tuvo mejor porcentaje con el 94%. En términos generales el modelo presentó algunas inconsistencias; pero es de resaltar que más de la mitad (57%) de los puntos correspondieron a susceptibilidades altas, el problema se presenta de los grados bajos y muy bajos de susceptibilidad (22% de los puntos) que en buena medida son causados por los resultados en las unidades III-1 (lu-ar), V-1 (Ige) y V-2 (Ige). Es de observar que la zona de lu-ar al Sureste del volcán Chichonal resultó con zonas

de alta y muy alta susceptibilidad, a pesar que en el inventario no se registro PRM superficiales, se cree que esto debe a una condición extra a las consideradas en el modelo que permite una mayor estabilidad.

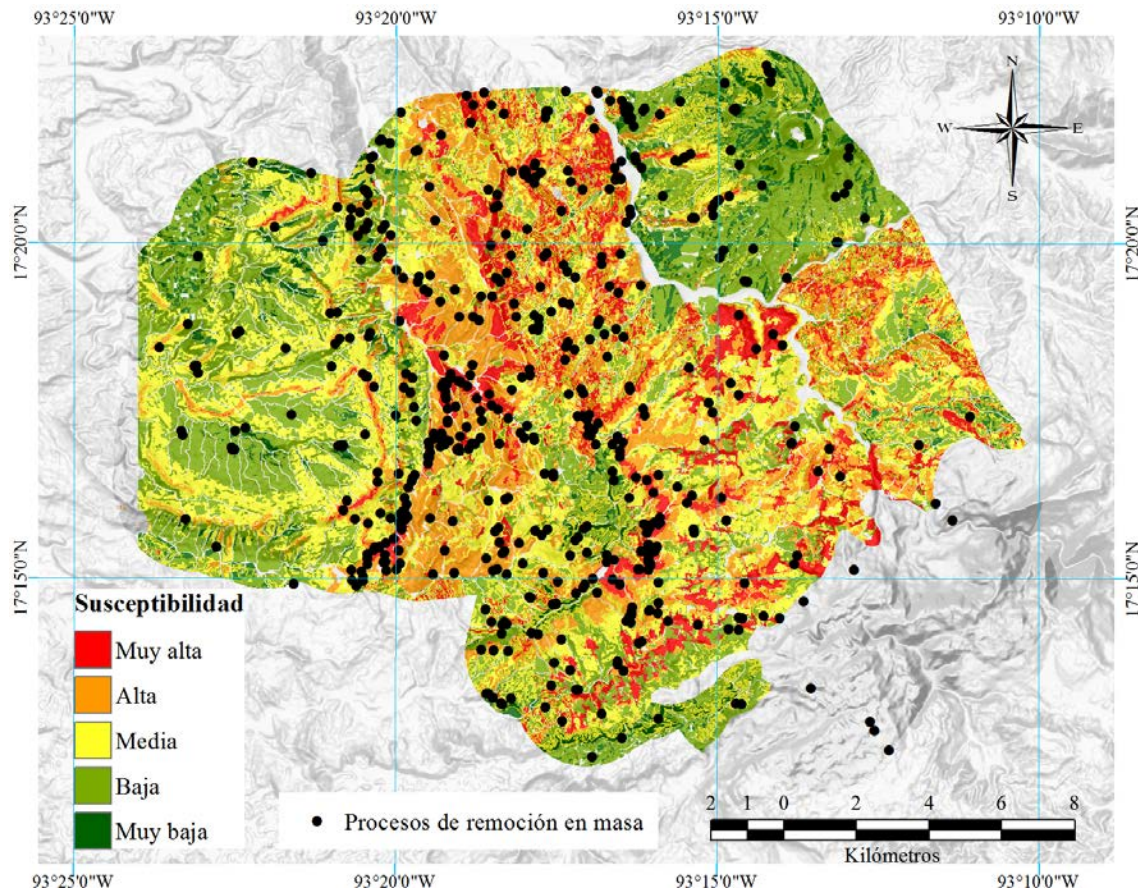


Figura III-7. Comparación del Mapa de susceptibilidad a PRM resultante y la distribución de los PRM del mapa inventario en puntos.

DISCUSIÓN

Los resultados arrojados por el modelo SPASTMO-SL se consideran satisfactorios, aunque es evidente que se debe seguir trabajando para mejorar su efectividad. El enfoque espacial aplicado en la metodología mejora el entendimiento de los factores causantes de los PRM al establecer patrones espaciales que describen la distribución de los valores que indican el grado de susceptibilidad, además de proponer un método para la elección de variables explicativas y criterios de ponderación diferente al aplicado hasta ahora. Lo anterior

permite desarrollar modelos que se ajustan a las condiciones particulares de una región. Otra innovación de este trabajo fue el cambio de dos tipos de criterios tradicionales de zonificación de la susceptibilidad a PRM. El primer método tradicional trata a la litología y estructura como una variable más a ponderar junto a las otras variables (Rossi *et al.*, 2010); el segundo, método divide en unidades (relativamente homogéneas) el área de estudio, pero le otorga un mismo valor a toda la superficie de la unidad (Castellanos y Van Westen, 2008); sin embargo, el grado de susceptibilidad puede variar al interior de cada unidad. En este caso se analizó la susceptibilidad a PRM dividiendo el área de estudio en regiones unidades con un criterio lito-estructural, así mismo, no es suficiente con otorgar una ponderación a la litología, sino se le debe tratar como el factor que repercute en el comportamiento de las otras variables causantes de PRM. La reflexión anterior y los resultados sugieren que el factor de la cubierta de vegetación, en el caso de la deforestación, debe ser tratado al igual que la litología como un factor que repercute en el comportamiento de otros factores, como la inclinación de la pendiente, orientación de ladera, altitud, proximidad a caminos.

La inclinación de la pendiente con las mayores probabilidades (0.6 a 1) fueron grados de inclinación bajos (entre 10° y 25°) en las unidades II-1, II-2, III-1 y IV-1 (Fig. III-4) que son unidades formadas por lutitas-areniscas, también en la unidad V-2 (Ige) se presentó una probabilidad arriba de 0.7 para grados de inclinación de 10%. En campo se observó que algunos PRM se presentaban en pendientes bajas, como resultado de la litología (lu-ar) y la estratigrafía del lugar, esto para el caso donde predomina la lutita. En el caso de la unidad V-2 que es una litología volcánica, no se tiene una explicación precisa. De acuerdo a la comparación entre unidades sin selva y con selva y las relaciones espaciales aplicadas en las unidades de paisaje (Tabla III-5): se puede inferir que la pérdida de vegetación implicó que las variables de orientación de la ladera e inclinación de la pendiente perdieron importancia ante las variables de proximidad a crestas y caminos.

En el caso de la zona de lu-ar al sureste del Chichonal donde la susceptibilidad resultó con grados altos, pero no se tiene registro de PRM en el inventario, es probable que exista una condición extra que permite mayor estabilidad. Puede ser que exista una cubierta de cenizas

arrojadas en las erupciones del Chichonal (Scolamacchia y Macias, 2005, Macías, *et al.*, 2008), lo genera una respuesta diferente al resto de la unidad de paisaje.

Se reconoce que es la primera vez que este método es aplicado a la zonificación de PRM por lo que aún se debe seguir explorando el uso de este modelo. Para mejorar el modelo SPASTMO-SL se sugiere generar unidades de paisaje más homogéneas, de superficies similares, así como integrar un número mayor de relaciones espaciales, como puede ser el grado de buzamiento, tomar en cuenta tipos de suelo, distribución de la precipitación, etc. Para próximos trabajos se debe decidir si se considera la proximidad al talveg, al ser la relación espacial menos relevante. El modelo debe ser aplicado en zonas con características físicas distintas a las de Francisco León para comparar resultados. Así también, se debe aplicar en zonas donde se cuente con un número importante de PRM inventariados, ya que de esto dependerá la robustez del análisis estadístico. Por último, se cree necesario someter el modelo a más métodos de evaluación, como la curva de ROC (Rossi *et al.*, 2010), además de medir su efectividad ante otro tipo de modelos como regresión logística (Felicísimo *et al.*, 2012, Das *et al.*, 2011, Rossi *et al.*, 2010), análisis discriminante (Carrara *et al.*, 1991, He *et al.*, 2012, Rossi *et al.*, 2010,) y análisis univariable (van Westen *et al.*, 2003, Ghosha *et al.*, 2011) con el propósito de seguir conociendo ventajas y desventajas del SPASTMO-SL.

CONCLUSIONES

Las relaciones espaciales entre los PRM y variables que condicionan la inestabilidad pueden explicar la existencia de PRM, por tanto, es posible modelar la susceptibilidad a PRM con base en los criterios del SPASTMO-SL. La fiabilidad de los resultados del SPASTMO-SL, dependerá de la escala, calidad y cantidad de información que se obtenga. Los resultados mostraron que regionalizar la zona de estudio en unidades de paisaje fue lo indicado, ya que la importancia de los factores cambia de acuerdo a las características morfológicas y geológicas. Regionalización que permitió demostrar que existe un comportamiento distinto con la presencia o ausencia de cobertura de selva. Las unidades de paisaje sin cobertura de selva interactuaron un número mayor de relaciones espaciales que

en unidades con cobertura de selva. La evaluación del factor antropogénico se realizó con dos variables; una con efecto directo como los caminos, y otra con efectos indirectos como la pérdida de la cubierta de selva, para ambas variables los resultados mostraron la relevancia del impacto antropogénico en los PRM. La primer variable; cercanía a caminos fue la relación espacial que más veces (4) obtuvo la ponderación más alta (Tabla III-4) por ende, es la variable cuya presencia representa el mayor potencial a los PRM y la segunda variable; ausencia de la cubierta de selva mostró que el cambio de las condiciones originales por la deforestación incrementa el grado de impacto de factores condicionantes y las variables relacionadas con la presencia de PRM.

REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O., Parrot, J. F., 2006, Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico: *Catena* 65, 152-165.
- Althuwaynee, O. F., Pradhan, B., Lee, S., 2012, Application of an evidential belief function model in landslide susceptibility mapping: *Computers & Geosciences* 44, 120-135.
- Borga, M., Tonelli, F., Fontana, G., y Cazorzi, F., 2005, Evaluating the influence of forest roads on shallow landsliding: *Ecological Modelling*, 187, 85-98.
- Carrara, A., 1983, Multivariate models for landslide hazard evaluation: *Mathematical Geology*. 15, 403-426.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, G., Pasqui, V., Reichenbach, P., 1991, GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard: *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 427-445.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti F., y Reichenbach P., 1995, GIS Technology in Mapping Landslide Hazard en Carrara. A. y Guzzetti F., *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 353 pp.
- Castellanos Abella, E. A., Van Westen, C. J., 2008, Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba: *Geomorphology* 94, 453-466.

- Dahl, Mads-Peter J., Mortensen, Lis E., Jensen, Niels H., Veihe, A., 2013, Magnitude–frequency characteristics and preparatory factors for spatial debris-slide distribution in the northern Faroe Islands: *Geomorphology* 188, 3-11.
- Dhakal, A., Sidle, R., 2003, Long-term modelling of landslides for different forest management practices: *Surface Processes and Landforms* 28, 853-868.
- Das, I., Stein, A., Kerle, N., Dadhwal, V. K., 2011, Probabilistic landslide hazard assessment using homogeneous susceptible units (HSU) along a national highway corridor in the northern Himalayas, India: *Landslides* 8, 293-308.
- Das, I., Sahoo, S., van Westen, C., Stein, A., Hack, R., 2010, Landslide susceptibility assessment using logistic regression and its comparison with a rock mass classification system, along a road section in the northern Himalayas (India): *Geomorphology* 114, 627-637.
- Duffield, W., Tilling, R., Canul, R., 1984, Geology of El Chichon Volcano, Chiapas, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 20, 117-132.
- Felicísimo, Á., Cuartero, A., Remondo, J., Quirós, E., 2012, Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study: *Landslides*, 10, 175-189.
- García-Palomo, A., Macías, J. L. , Espíndola, J. M., 2004, Strike-slip faults and K-alkaline volcanism at El Chichón volcano, southeastern Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 136, 247-268.
- García-Ruiz, J., Beguería, S., Alatorre, L., Puigdefábregas, J., 2010, Land cover changes and shallow landsliding in the flysch sector of the Spanish Pyrenees: *Geomorphology* 124, 250-259.
- Ghosh, S., Carranza, E. J. M., van Westen, C.J., Jetten, V. G., Bhattacharya, D. N., 2011, Selecting and weighting spatial predictors for empirical modeling of landslide susceptibility in the Darjeeling Himalayas (India): *Geomorphology* 131(1-2), 35-56.
- He, S., Pan, P., Dai, L., Wang, H., Liu, J., 2012, Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China: *Geomorphology*, 171-172, 30-41.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1982, Conjunto de Datos Geológicos Vectoriales E1508. Escala 1:250,000. Serie I: Aguascalientes,

- Aguascalientes., México, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 1 mapa.
- Knapen, A., Kitutu, M., Poesen, J., Breugelmans, W., Deckers, J., Muwanga, A., 2006, Landslides in a densely populated county at the footslopes of Mount Elgon, Uganda: Characteristics and causal factors: *Geomorphology* 73, 149-165.
- Karsli, F., Atasoy, M., Yalcin, A., Demir, O., Gokceoglu, C., 2009, Effects of land-use changes on landslides in a landslide-prone area (Ardesen, Rize, NE Turkey): *Environ Monit Assess* 156, 241-255.
- Macías, J. L., Capra, L., Arce, J. L., Espíndola, J. M., García-Palomo, A., Sheridan, M. F., 2008, Hazard map of El Chichón volcano, Chiapas, México: Constraints posed by eruptive history and computer simulations: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 175, 444-458.
- Morales Manilla, L. M., 2013, The Definition Of A Minimum Set Of Spatial Relations: Morelia, México, Universidad Nacional Autónoma de México, Tesis doctoral, 164 pp.
- Muñiz-Jauregui, J. A., 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.
- Murayama, Y. y Thapa, R. B., 2011, Spatial Analysis: Evolution, Methods, and Applications: en *Spatial Analysis and Modeling*, in Murayama, Y. y Thapa, R. B., (eds) *Geographical Transformation Process, GIS-based Applications*: Dordrecht Heidelberg London New York, Elsevier, 1-26.
- Piacentini, D., Troiani, F., Soldati, M., Notarnicola, C., Savelli, D., Schneiderbauer, S., Strada, C., 2012, Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy): *Geomorphology* 151-152, 196-206.
- Qi, S., Xu, Q., Lan, H., Zhang, B., Liu, J., 2010, Spatial distribution analysis of landslides triggered by 2008.5.12 Wenchuan Earthquake, China: *Engineering Geology*, 6(1-2), 95-108.
- Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A. C., Peruccacci, S., 2010, Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts: *Geomorphology* 114, 129-142.

- Santos, A. M., Phoon, K., Quek, S., 2011, Effects of soil spatial variability on rainfall-induced landslides: *Computers & Structures*, 89(11-12), 893-900.
- Scolamacchia, T., Macías J. L., 2005, Distribution and stratigraphy of deposits produced by diluted pyroclastic density currents of the 1982 eruption of El Chichón volcano, Chiapas, Mexico: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(2), 159-180.
- Slide, R. C., Ochiai, H., 2006, *Landslides: Processes, Prediction, and Land Use*. USA: American Geophysical Union.
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., De Bievre, B., 2003, Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean: *Geomorphology* 52, 299-315.
- Van Den E., M., Poesen, J., Vandekerckhove, L., Van Gils, M., Van Rompaey, A., 2010, Human-environment interactions in residential areas susceptible to landsliding: the Flemish Ardennes case study: *Area*, 42(3), 339-358.
- Van Westen, C. J., Rengers, N., Soeters, R., 2003, Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment: *Natural Hazards* 30, 399-419.
- van Westen, C.J., van Asch, T.W.J., Soeters, R., 2006, Landslide hazard and risk zonation-why is it still so difficult?: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65(2), 167-184.
- Varnes D. J., 1984, *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*: Unesco, Francia.
- Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Dewitte, O., Demoulin, A., De Bo, H., Vanmaercke-Gottigny, M. C., 2007, Reactivation of old landslides: lessons learned from a case-study in the Flemish Ardennes (Belgium): *Soil Use and Management* 23, 200-211
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., De Bievre, B., 2003, Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean: *Geomorphology* 52, 299-315.
- Wemple, B. C., Swanson, F. J., Jones, J. A., 2001, Forest roads and geomorphic process interactions, Cascade Range, Oregon: *Earth Surface Processes and Landforms* 26: 191-204.

DISCUSIÓN GENERAL

En el primer capítulo después de una revisión de trabajos publicados para conocer la influencia en los PRM, se estableció que existen tres grupos de impactos antropogénicos que provocan PRM: cambio de uso de suelo, incendios, que ambos producen un decremento en la resistencia a los esfuerzos del cortante (cambios lentos) y modificación del relieve que aumenta el esfuerzo de cortante (cambios rápidos). Estos factores propician: cambios en la hidrología (Buccolini *et al.*, 2007, Knapen *et al.*, 2006), degradación de suelos (Preuth *et al.*, 2010, Gabet y Sternberg, 2008) y pérdida de las funciones de la vegetación (García-Ruiz *et al.*, 2010, Styczen y Morgan, 1995). También con base en los datos expuestos se determinó que en realidad el factor antropogénico es un factor preparatorio muy activo y dinámico, que reduce directa e indirectamente el margen de estabilidad de las laderas y en consecuencia contribuye a la formación de PRM (Muñiz-Jauregui y Hernández-Madrigal, 2012, Knapen *et al.*, 2006, Vanacker *et al.*, 2003).

Después de aplicar el modelo SPASTMO-SL y evaluar espacialmente dos tipos de factores antropogénicos: cambio de uso del suelo (deforestación) y la expansión de infraestructura (caminos), que incluye modificación al relieve; se determinó que los resultados no contradicen la idea expuesta en el capítulo I, que el factor antropogénico es un factor preparatorio capaz de reducir la estabilidad, sino los resultados permiten agregar la idea del factor antropogénico como un factor que tienen la propiedad de impactar en el comportamiento de otros factores, modificando su grado de afectación. Por tanto, no se puede indicar un nivel de relevancia único que defina a los factores antropogénicos, ya que este cambiará dependiendo de las condiciones físicas del lugar. Si bien los resultados para el municipio de Francisco León indicaron que en el caso de cercanía a caminos su ponderación resultó ser la más relevante en cuatro unidades, no se puede establecer un valor único.

Los resultados arrojados por el modelo SPASTMO-SL se consideran satisfactorios, aunque es evidente que se debe seguir trabajando para mejorar su efectividad. El enfoque espacial aplicado en la metodología mejora el entendimiento de los factores causantes de los PRM al

establecer patrones espaciales que describen la distribución de los valores que indican el grado de susceptibilidad, además de proponer un método para la elección de variables explicativas y criterios de ponderación diferente al aplicado hasta ahora. Otra innovación de este trabajo fue el cambio de dos tipos de criterios tradicionales de zonificación de la susceptibilidad a PRM, el primero método tradicional trata a la litología y estructura como una variable más a ponderar junto a las otras variables (Rossi *et al.*, 2010), y segundo, el método que divide en unidades el área de estudio en unidades relativamente homogéneas, pero le otorga un mismo valor a toda la superficie de la unidad (Castellanos y Van Westen, 2008); sin embargo, el grado de susceptibilidad puede variar al interior de cada unidad.

SPASTMO-SL respondió al interés de evaluar el factor antropogénico con resultados interesantes. Como se mencionó con anterioridad, se utilizan dos estrategias. La primera fue la comparación espacial entre zonas afectadas por deforestación y aquellas que aún conservan su cobertura natural (selva) y la otra la evaluación estadística como una variable explicativa (proximidad a caminos) usando para ambas el análisis espacial. Otros trabajos expuestos en el capítulo I que analizaron el impacto de uno o más factores antropogénicos, usaron métodos del tipo determinístico donde con base a la ecuación del factor de seguridad (ecuación I-2), se modificaron los valores de cada variables afectada cambios antrópicos (Dhakal y Sidle 2003, Vanacker *et al.*, 2003, Van Beek y Van Asch, 2004, Bathurst *et al.*, 2007, 2010, García-Ruiz *et al.*, 2010). Un ejemplo de variables afectadas por factores antropogénicos son las asociadas a la vegetación: cohesión, cambio en superficie freática, sobrepeso de la vegetación, fuerza de tensión de las raíces actuando sobre la superficie de deslizamiento y ángulo de las raíces con referencia a la superficie de deslizamiento (Norris *et al.*, 2008, Greenwood *et al.*, 2004). Pero el método determinístico generaliza las condiciones en una ladera y del tipo de vegetación, lo que dista de la realidad. También se presentaron otro tipo de métodos que el único resultado que aportaron fue concluir que la frecuencia de PRM aumentó o que se generaba otras clases de movimientos de remoción en masa en zonas con afectaciones antropogénicas, sin dar una explicación clara del porqué ocurrían los cambios (Karsli *et al.*, 2009, Smyth y Royle, 2000, Alcántara-Ayala *et al.*, 2006, Schneider *et al.*, 2010). En contraste el uso de SPASTMO-SL permitió indicar cuáles

son las variables que intervienen en una zona afectadas (sin selva), distinguir su comportamiento a diferencia de zonas conservadas (selva) y como cambia su grado de relevancia.

Se reconoce que es la primera vez que este método es aplicado a la zonificación de PRM por lo que aún se debe seguir explorando el uso de este modelo. Es necesario someter el modelo a más métodos de evaluación, como la curva de ROC (Rossi *et al.*, 2010) que por falta de información que requiere el modelo no se pudo aplicar, además de medir su efectividad ante otro tipo de modelos, con el propósito de seguir conociendo ventajas y desventajas del SPASTMO-SL.

Aún así se puede determinar que la principal ventaja del modelo es el uso de las funciones de preferencia que en contraste con otros métodos estadísticos multivariantes que su evaluación se basa en determinar por unidad de terreno o pixel la presencia o ausencia de PRM (Carrara *et al.*, 1991, He *et al.*, 2012, Rossi *et al.*, 2010, Das *et al.*, 2011, Felicísimo *et al.*, 2012). SPASTMO-SL no lo hace así, sino que la probabilidad va disminuyendo o aumentando con una continuidad de valores en el espacio. Lo que permite evaluar y entender cómo se comportan los valores más propensos a los PRM, que en el caso de otros métodos multivariantes son valores absolutos o rangos lo que se evalúa, algo similar ocurre con los métodos univariantes que se basan en la coincidencia de PRM para cada variable para otorgar una ponderación, que será absoluta para todos los valores de una variable o de rangos analizados (van Westen *et al.*, 2003, Ghosha *et al.*, 2011). Es ventaja de SPASTMO-SL diferenciar en unidades la zona de estudio con el objetivo de evaluar las variables de manera diferenciada, basado en la idea que en el espacio geográfico hay zonas que comparten características y otras con marcadas diferencias entre sí (Bocco *et al.*, 2010), pero a la vez se puede considerar una desventaja, que el proceso de generalización espacial significa perder detalles. Una desventaja del modelo SPASTMO-SL es la complejidad del modelo ya que requiere de varios insumos y puede requerir una cantidad importante de cálculos, lo que dependerá del número de unidades de paisaje que integre la zona de estudio. Otra desventaja es que las relaciones espaciales pueden ser variables asociadas, lo que dificulta la interpretación de los resultados al no poder atribuir factores precisos de la

inestabilidad, como es el caso de la altitud, donde puede estar representando un cambio en las condiciones climáticas, pero también puede referir a la predominancia de procesos de erosión en laderas o algún tipo de estructura geológica.

REFERENCIAS

- Alcántara-Ayala, I., Esteban-Chávez, O., Parrot, J. F., 2006, Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico: *Catena* 65, 152-165.
- Bathurst, J., Bovoloa, C. I., Cisnerosb, F., 2010, Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale: *Ecological Engineering* 36(3), 317-327.
- Bathurst, J., Moretti, G., El-Hames, A., Beguería, S. y García-Ruiz, J. M., 2007, Modelling the impact of forest loss on shallow landslide sediment yield, Ijuez river catchment, Spanish Pyrenees: *Hydrology & Earth System Sciences* 11(1), 569-583.
- Bocco, G., Mendoza, M., Priego, A., Burgos, A., 2010, La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación del territorio: Serie Planeación territorial, Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología, UNAM, 71 pp.
- Buccolini, M., Gentili, B., Materazzi, M., Aringoli, D., Pambianchi, G., Piacentini, T., 2007 Human impact and slope dynamics evolutionary trends in the monoclinal relief of Adriatic area of central Italy: *Catena* 71, 96-109.
- Carrara, A., Cardinali, M., Detti, R., Guzzetti, G., Pasqui, V., Reichenbach, P., 1991, GIS techniques and statistical models in evaluating landslide hazard: *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 427-445.
- Castellanos Abella, E. A., Van Westen, C. J., 2008, Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba: *Geomorphology* 94, 453-466.
- Das, I., Stein, A., Kerle, N., Dadhwal, V. K., 2011, Probabilistic landslide hazard assessment using homogeneous susceptible units (HSU) along a national highway corridor in the northern Himalayas, India: *Landslides* 8, 293-308.
- Dhakal, A., Sidle, R., 2003, Long-term modelling of landslides for different forest management practices: *Surface Processes and Landforms* 28, 853-868.

- Felicísimo, Á., Cuartero, A., Remondo, J., Quirós, E., 2012, Mapping landslide susceptibility with logistic regression, multiple adaptive regression splines, classification and regression trees, and maximum entropy methods: a comparative study: *Landslides*, 10, 175-189.
- Gabet, E., Sternberg, S., 2008, The effects of vegetative ash on infiltration capacity, sediment transport, and the generation of progressively bulked debris flows: *Geomorphology* 101, 666-673.
- García-Ruiz, J., Beguería, S., Alatorre, L., Puigdefábregas, J., 2010, Land cover changes and shallow landsliding in the flysch sector of the Spanish Pyrenees: *Geomorphology* 124, 250-259.
- Ghosh, S., Carranza, E. J. M., van Westen, C.J., Jetten, V. G., Bhattacharya, D. N., 2011, Selecting and weighting spatial predictors for empirical modeling of landslide susceptibility in the Darjeeling Himalayas (India): *Geomorphology* 131(1-2), 35-56.
- Greenwood, J. R., Norris, J. E., Wint, J., 2004, Assessing the contribution of vegetation to slope stability, *Geotechnical Engineering* 157, 199-208.
- He, S., Pan, P., Dai, L., Wang, H., Liu, J., 2012, Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China: *Geomorphology*, 171-172, 30-41.
- Karsli, F., Atasoy M., Yalcin, A. Demir, O., Gokceoglu, C., 2009, Effects of land-use changes on landslides in a landslide-prone area (Ardesen, Rize, NE Turkey): *Environ Monit Assess* 156, 241-255.
- Knapen, A., Kitutu, M., Poesen, J., Breugelmans, W., Deckers, J., Muwanga, A., 2006, Landslides in a densely populated county at the footslopes of Mount Elgon, Uganda: Characteristics and causal factors: *Geomorphology* 73, 149-165.
- Muñiz-Jauregui, J. A., 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.
- Norris, J. E., Greenwood, J. R., Achim, A., Gardiner, B. A., Nicoll, B., Cammeraat, E., Mickovski, S. B., 2008, Hazard Assessment Of Vegetated Slopes. En: Norris, J. E., Stokes, A., Mickovski, S. B., Cammeraat, E., van Beek, R., Nicoll, B., Achim, A., (Ed), *Slope Stability And Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. Dordrecht. Springer, 290 pp.

- Preuth, T., Glade, T., Demoulin, A., 2010, Stability analysis of a human-influenced landslide in eastern Belgium: *Geomorphology* 120, 38-47.
- Rossi, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., Mondini, A. C., Peruccacci, S., 2010, Optimal landslide susceptibility zonation based on multiple forecasts: *Geomorphology* 114, 129-142.
- Schneider, H., Höfer, D., Irmeler, R., Daut, G., Mäusbacher, R., 2010, Correlation between climate, man and debris flow events - A palynological approach: *Geomorphology* 120, 48-55.
- Smyth, C. G., Royle, S. A., 2000, Urban landslide hazards: incidence and causative factors in Niterói, Rio de Janeiro State, Brazil: *Applied Geography* 20, 95-117.
- Styczen, M., Morgan, R., 1995, Engineering properties of vegetation. En: Morgan, R. y Rickson, R., (Ed), *Slope stabilization and erosion control: a bioengineering approach*. London: E y F N Spon. 288 pp.
- Van Beek, R., Cammeraat, E., Andreu, V., Mickovski, S. B., Dorren, L., 2008, Hillslope Processes: Mass Wasting, Slope Stability And Erosion. En Norris, J. E., Stokes, A., Mickovski, S.B., Cammeraat. E., van Beek, R., Nicoll, B., Achim, A., (Ed,) *Slope Stability And Erosion Control: Ecotechnological Solutions*. Dordrecht. Springer, 290 pp.
- Van Westen, C. J., Rengers, N., Soeters, R., 2003, Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment: *Natural Hazards* 30, 399-419.
- Vanacker, V., Vanderschaeghe, M., Govers, G., Willems, E., Poesen, J., Deckers, J., De Bievre, B., 2003, Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean: *Geomorphology* 52, 299-315.

CONCLUSIONES GENERALES

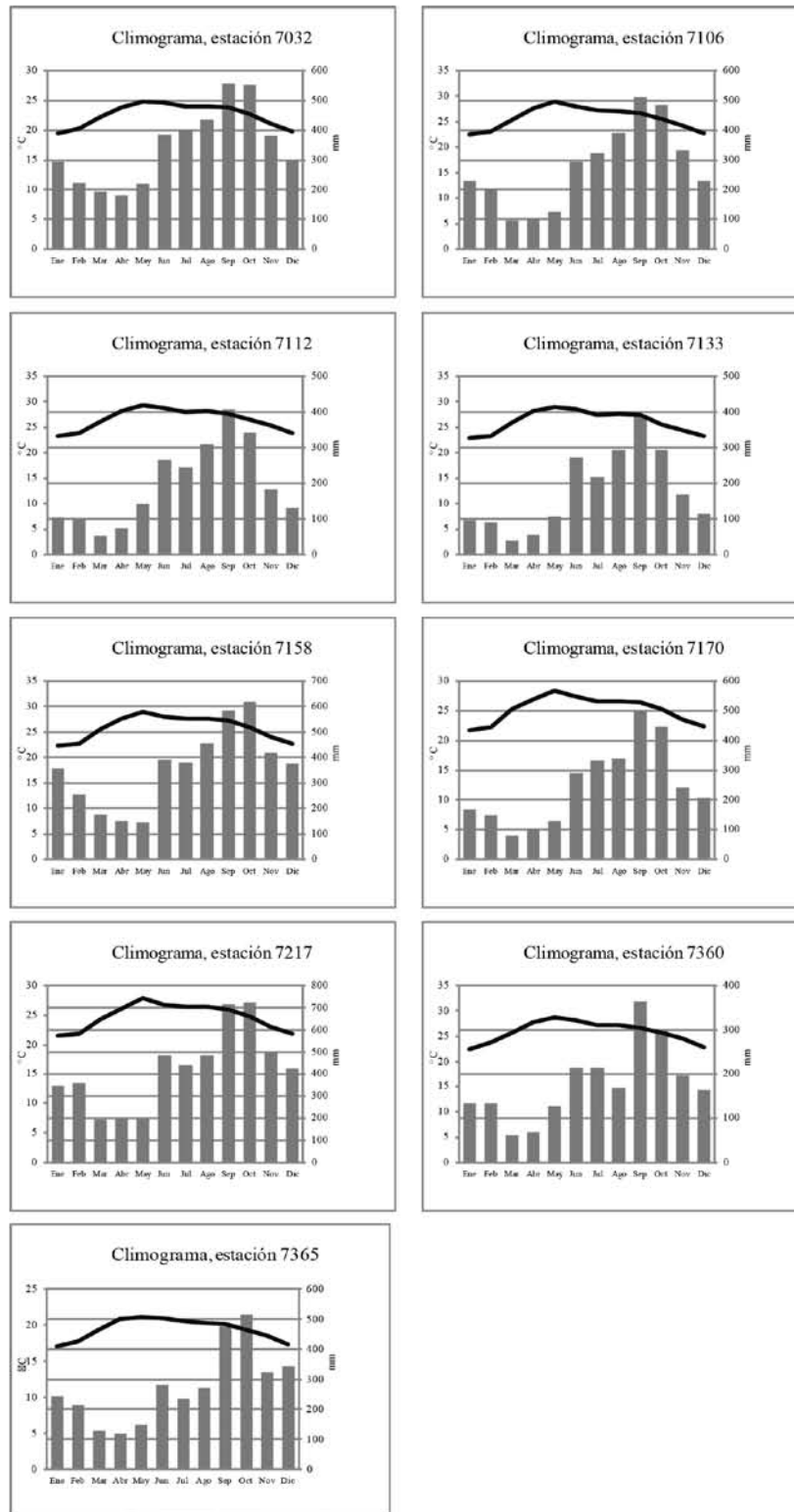
El factor antropogénico son las acciones del ser humano que cambian o alteran un entorno que previamente se encontraba en un estado natural. En el contexto de los PRM es el factor que produce cambios, degradación, o pérdida de factores hidrológicos, edafológicos, físicos y biológicos presentes en una ladera, lo que se traduce en el decremento de la resistencia a los esfuerzos cortantes o el aumento del esfuerzo del cortante, y que finalmente es lo lleva a la ocurrencia del PRM.

El uso del modelo SPASTMO-SL ayudó a entender que la relevancia del factor antropogénico, estriba en hacer más complejo el escenario que genera PRM, cambiando el nivel de impacto de factores naturales que provocan los PRM.

Por último, se demostró que la Geografía si tiene las herramientas para abordar a los procesos de remoción en masa, como es el análisis la distribución de factores en el espacio y búsqueda de patrones espaciales, que son enfoques que aportan al conocimiento de este tipo de fenómenos peligrosos y mejoran la comprensión de la relación que existe entre factores que condicionan la presencia de PRM.

ANEXO

CLIMOGRAMAS DE ESTACIONES METEOROLÓGICAS CERCANAS A LA ZONA DE ESTUDIO



ESTADÍSTICOS APLICADOS EN SPASTMO-SL

Prueba t de student

El estadístico compara las medias de dos grupos de poblaciones con distribución normal.

$$t = \frac{(\bar{X} - \mu)}{\frac{S_x}{\sqrt{n}}}$$

Donde

\bar{X} = Media

μ = valor a analizar

S_x = Desviación estándar

n = Tamaño de muestra

Prueba F de Fisher

El estadístico compara la varianza de dos poblaciones con distribución normal.

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$$

Donde:

S^2 = Varianza

Prueba de W de Wilcoxon

El estadístico compara la mediana para dos muestras con distribuciones que no cumplen con la normalidad.

$$W = \sum R_i$$

Donde:

R = Rangos asociados a las diferencias de medianas

Prueba de D de Kolmogorov-Smirnoff

Esta prueba no paramétrica se basa en el cálculo de la distancia vertical máxima entre las funciones de distribución acumuladas de las dos muestras, que aproximadamente es la máxima distancia entre los dos gráficos de cuantiles. Si la máxima distancia es lo suficientemente grande, las dos muestras pueden ser declaradas provenientes de poblaciones significativamente diferentes. Esta prueba se basa en el estadístico D .

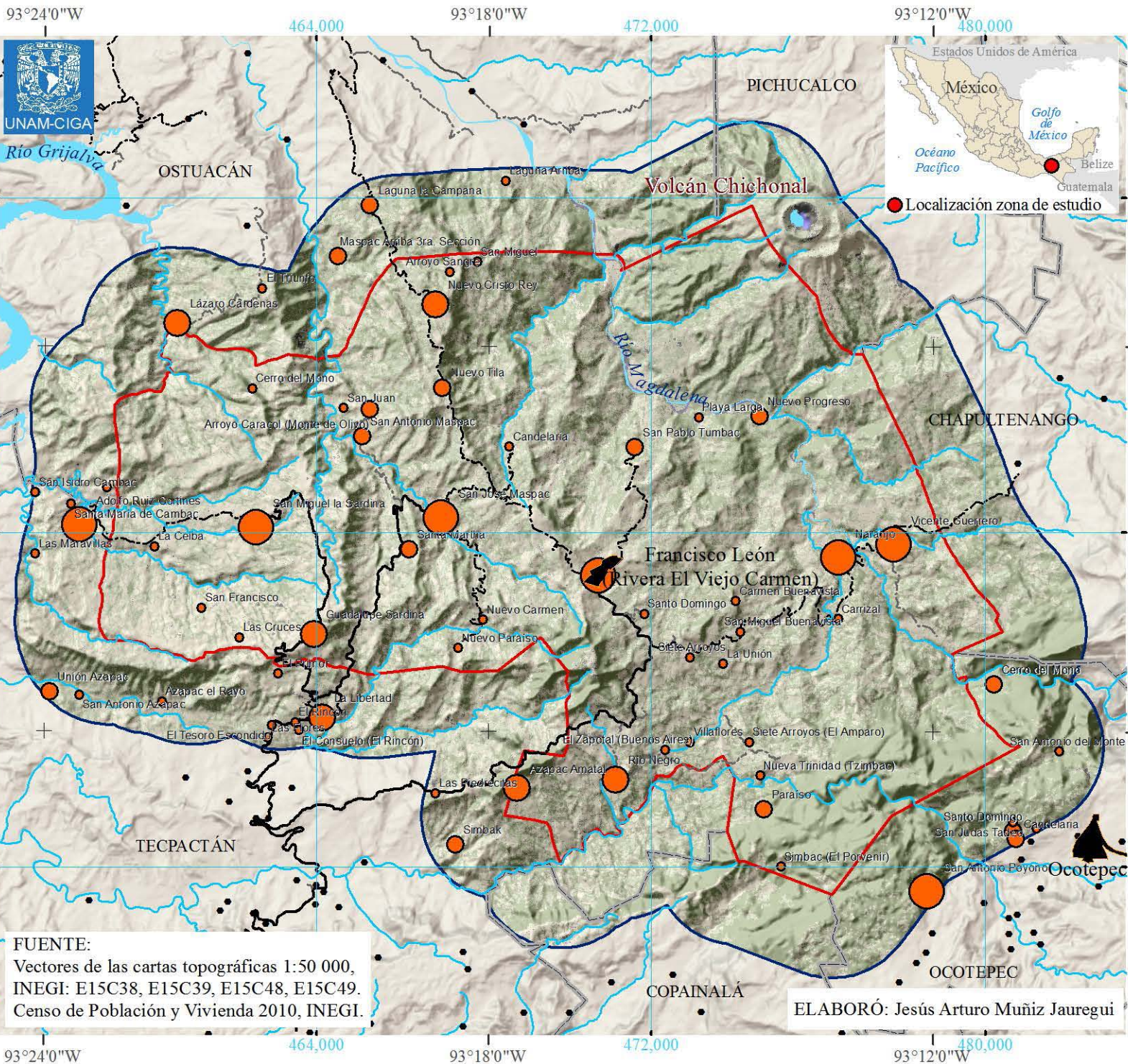
$$|D| = |F_{oACUM} - F_{TACUM}|$$

Donde:

F_{oACUM} = Frecuencia observada acumulada

F_{TACUM} = Frecuencia teórica acumulada

CARTOGRAFÍA



Mapa base

- Simbología**
- Río
 - Cuerpo de agua
 - Localidades
- Localidades zona de estudio**
- Habitantes
- 1 - 100
 - 100 - 250
 - 250 - 500
 - 500 - 1,106
- Carretera estatal
 - Camino pavimentado
 - Terracería
 - Brecha
 - Límites municipales
 - Límite Francisco León
 - Zonas urbanas
 - Área de estudio

17°20'0"N
17°12'0"N
17°04'0"N

1,920,000
1,912,000
1,904,000

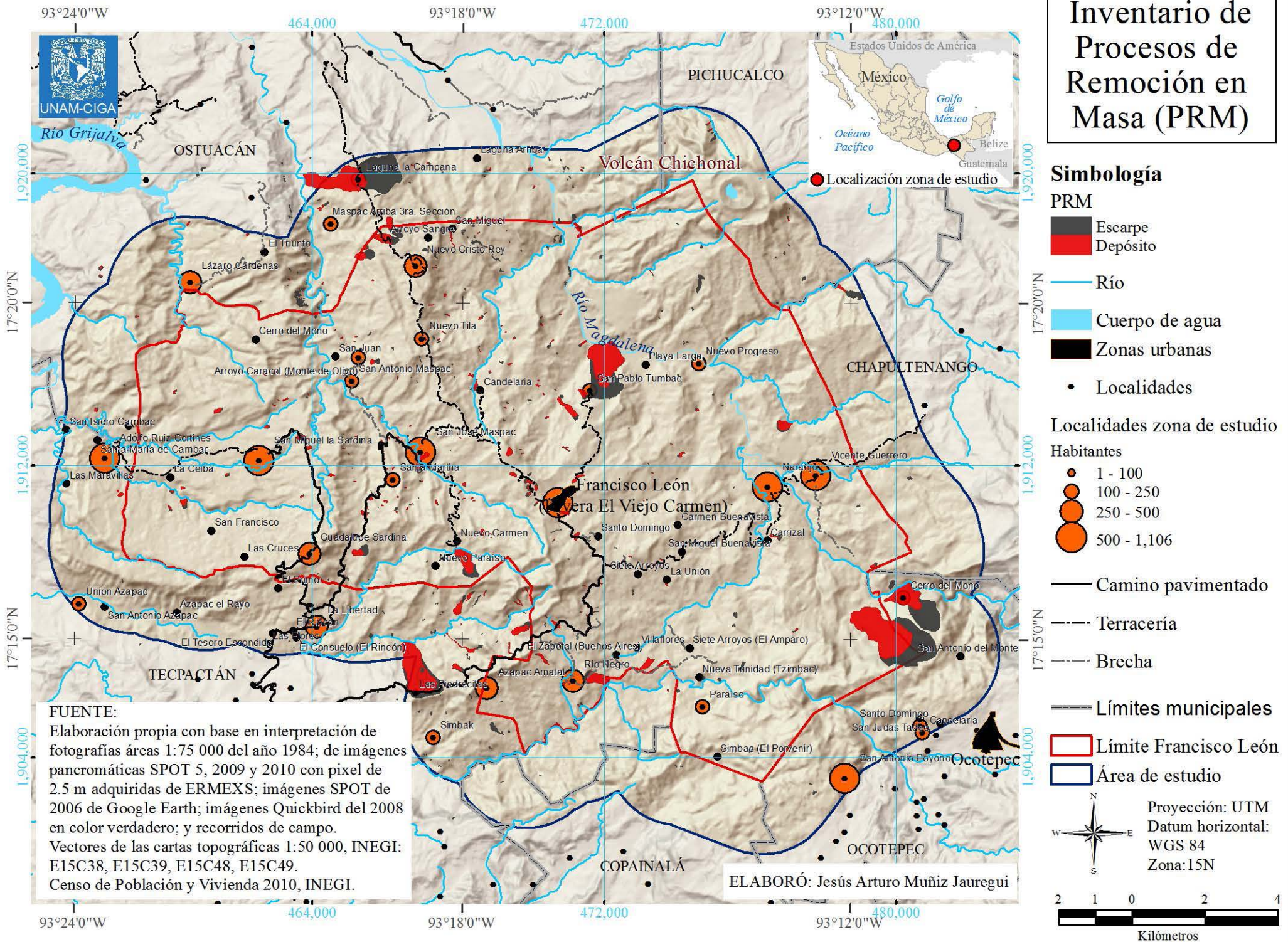
FUENTE:
 Vectores de las cartas topográficas 1:50 000,
 INEGI: E15C38, E15C39, E15C48, E15C49.
 Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI.

ELABORÓ: Jesús Arturo Muñiz Jauregui

Proyección: UTM
 Datum horizontal:
 WGS 84
 Zona: 15N

2 1 0 2 4
Kilómetros

Inventario de Procesos de Remoción en Masa (PRM)

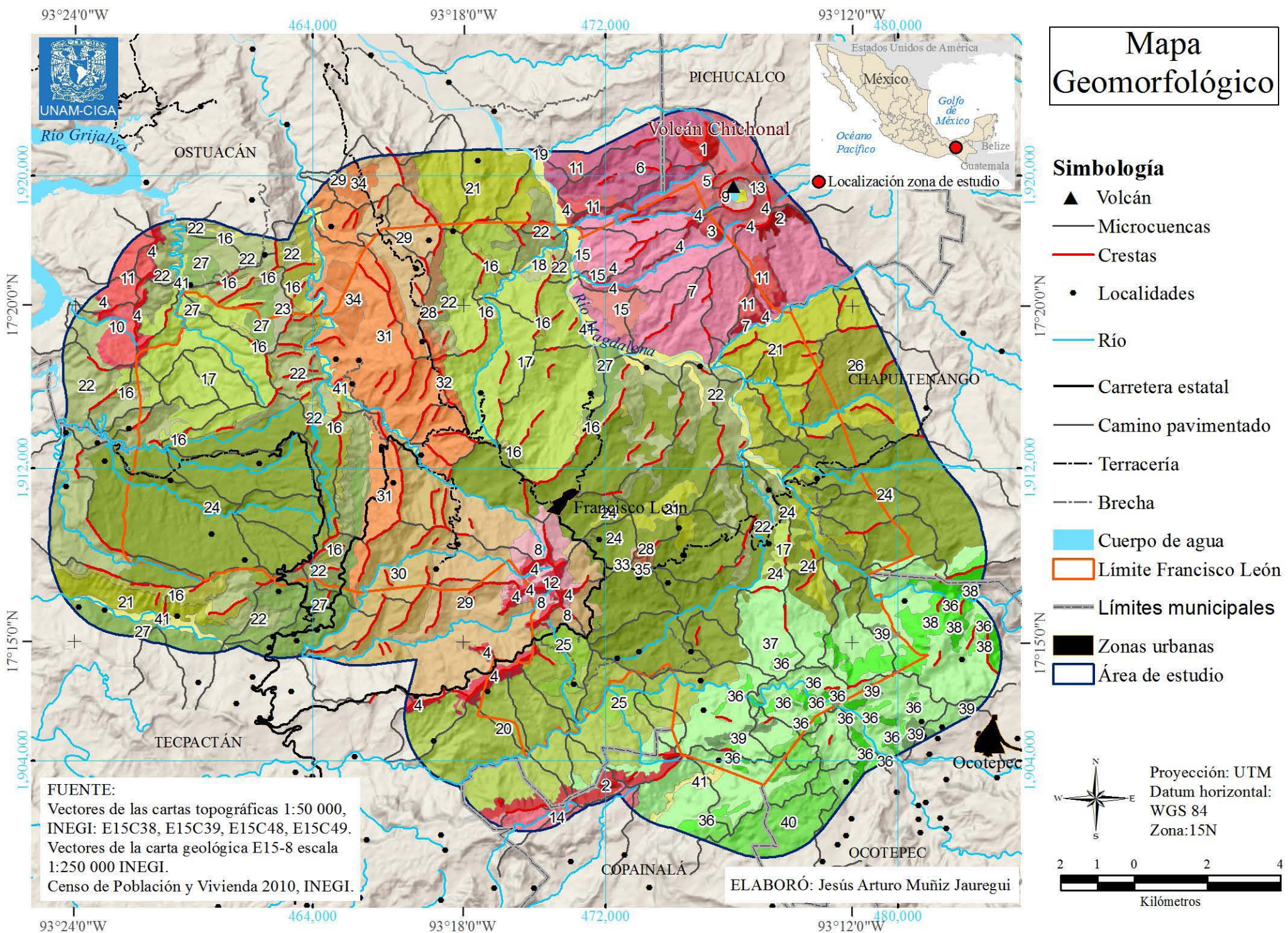


FUENTE:

Elaboración propia con base en interpretación de fotografías áreas 1:75 000 del año 1984; de imágenes pancromáticas SPOT 5, 2009 y 2010 con pixel de 2.5 m adquiridas de ERMEXS; imágenes SPOT de 2006 de Google Earth; imágenes Quickbird del 2008 en color verdadero; y recorridos de campo. Vectores de las cartas topográficas 1:50 000, INEGI: E15C38, E15C39, E15C48, E15C49. Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI.

ELABORÓ: Jesús Arturo Muñiz Jauregui

Mapa Geomorfológico



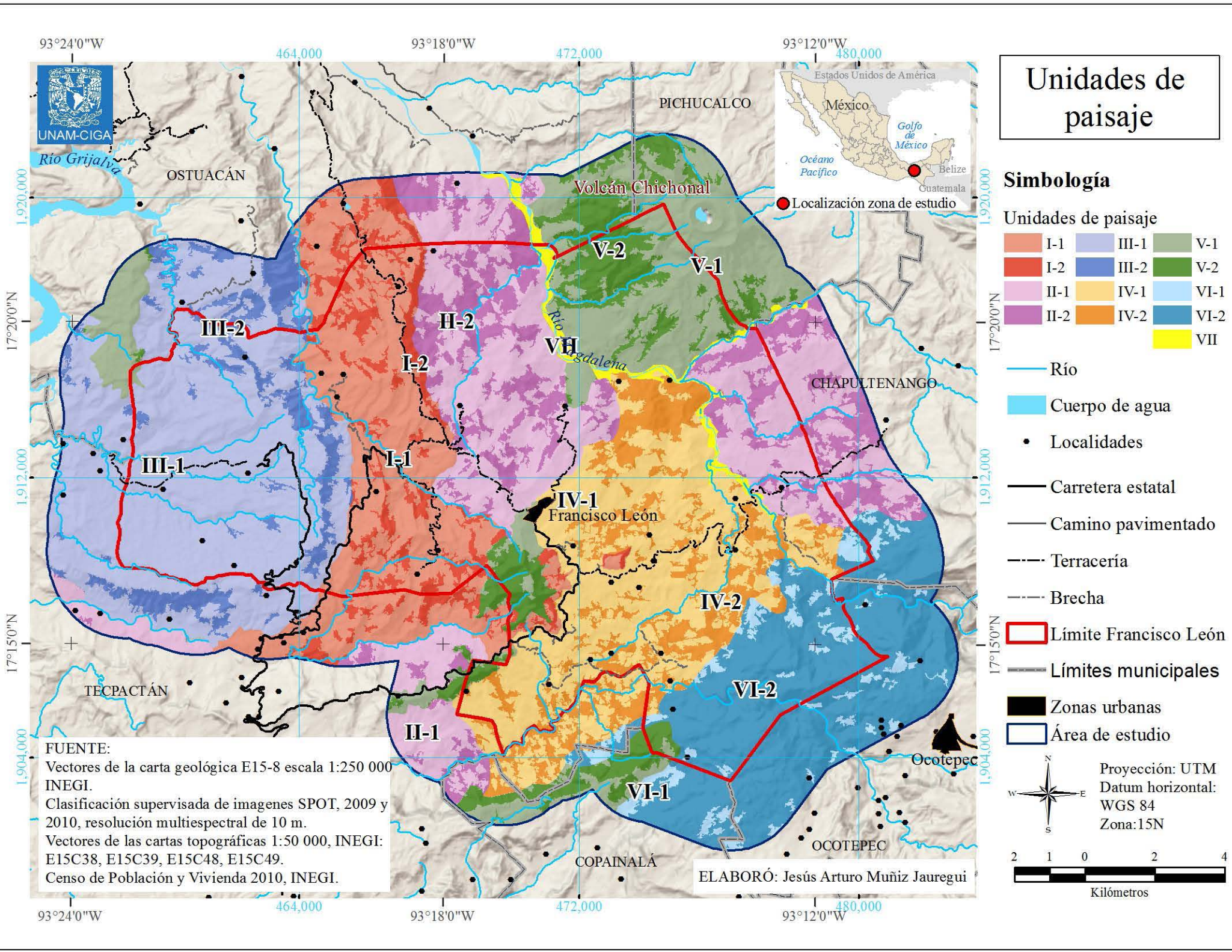
- Simbología**
- ▲ Volcán
 - Microcuencas
 - Crestas
 - Localidades
 - Río
 - Carretera estatal
 - Camino pavimentado
 - - - Terracería
 - - - Brecha
 - Cuerpo de agua
 - Límite Francisco León
 - Límites municipales
 - Zonas urbanas
 - Área de estudio

FUENTE:
 Vectores de las cartas topográficas 1:50 000,
 INEGI: E15C38, E15C39, E15C48, E15C49.
 Vectores de la carta geológica E15-8 escala
 1:250 000 INEGI.
 Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI.

ELABORÓ: Jesús Arturo Muñiz Jauregui

Proyección: UTM
 Datum horizontal:
 WGS 84
 Zona: 15N

2 1 0 2 4
 Kilómetros



Unidades de paisaje

Simbología

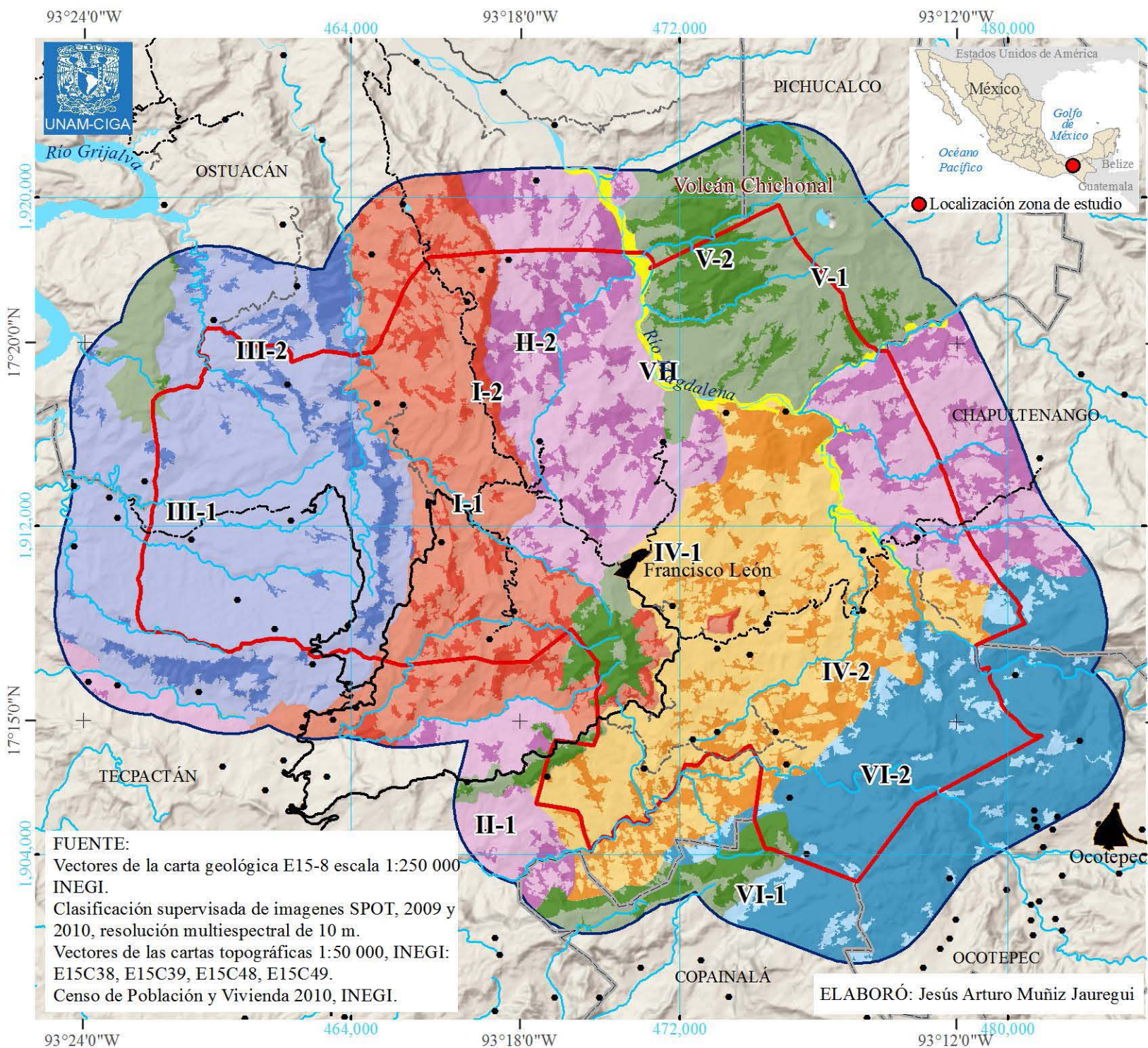
- Unidades de paisaje
- I-1
 - I-2
 - II-1
 - II-2
 - III-1
 - III-2
 - IV-1
 - IV-2
 - V-1
 - V-2
 - VI-1
 - VI-2
 - VII

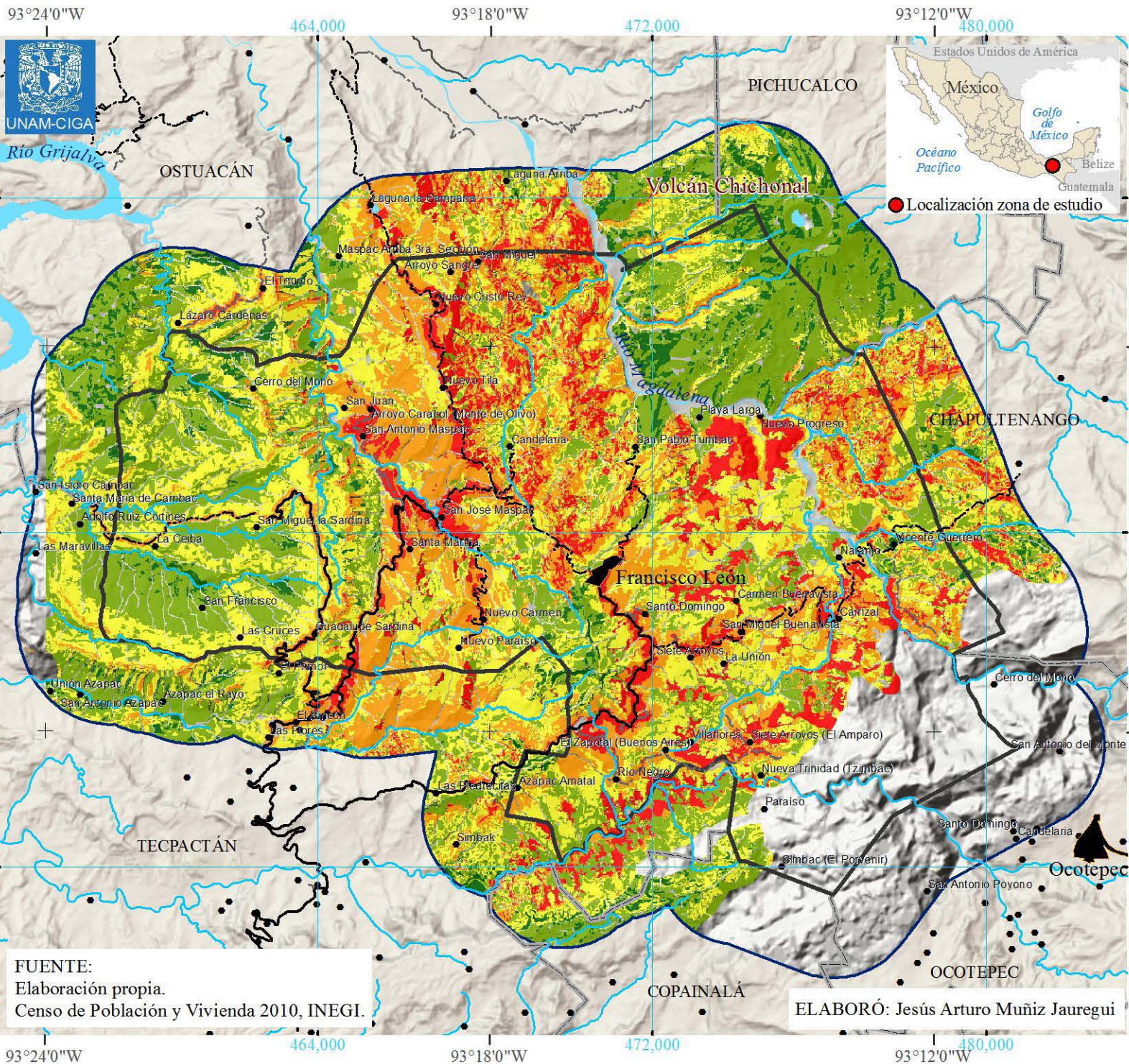
- Río
- Cuerpo de agua
- Localidades
- Carretera estatal
- Camino pavimentado
- Terracería
- Brecha
- Límite Francisco León
- Límites municipales
- Zonas urbanas
- Área de estudio

Proyección: UTM
 Datum horizontal: WGS 84
 Zona: 15N

FUENTE:
 Vectores de la carta geológica E15-8 escala 1:250 000 INEGI.
 Clasificación supervisada de imágenes SPOT, 2009 y 2010, resolución multispectral de 10 m.
 Vectores de las cartas topográficas 1:50 000, INEGI: E15C38, E15C39, E15C48, E15C49.
 Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI.

ELABORÓ: Jesús Arturo Muñiz Jauregui





Susceptibilidad a Procesos de Remoción en Masa

Simbología

Susceptibilidad

- Muy alta
- Alta
- Media
- Baja
- Muy baja

- Río
- Cuerpo de agua
- Localidades
- Carretera estatal
- Camino pavimentado
- Terracería
- Brecha
- Límites municipales
- Límite Francisco León
- Zonas urbanas
- Área de estudio

Proyección: UTM
 Datum horizontal: WGS 84
 Zona: 15N

2 1 0 2 4
Kilómetros

FUENTE:
 Elaboración propia.
 Censo de Población y Vivienda 2010, INEGI.

ELABORÓ: Jesús Arturo Muñiz Jauregui