



# UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA

**MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO DE ANGANGUEO,  
MICHOCÁN, MEDIANTE PROBABILIDAD CONDICIONAL ENFOCADA AL SIG**

**TESIS:**

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS**

CON ESPECIALIDAD EN

**GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

PRESENTA

**L.C.F.M. LUCÍA TORRES FERNÁNDEZ**

ASESOR:

**DR. VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL**

CO- ASESOR:

**DR. FRANCISCO JAVIER DOMÍNGUEZ MOTA**

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO, SEPTIEMBRE, 2014



# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA

**MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS DESLIZAMIENTOS EN EL MUNICIPIO DE ANGANGUEO,  
MICHOACÁN, MEDIANTE PROBABILIDAD CONDICIONAL ENFOCADA AL SIG**

**TESIS:**

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRA EN CIENCIAS**

CON ESPECIALIDAD EN  
**GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

PRESENTA

**L.C.F.M. LUCÍA TORRES FERNÁNDEZ**

ASESOR:

**DR. VÍCTOR MANUEL HERNÁNDEZ MADRIGAL**

DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

CO- ASESOR:

**DR. FRANCISCO JAVIER DOMÍNGUEZ MOTA**

DOCTORADO EN CIENCIAS (MATEMÁTICAS)

MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO, SEPTIEMBRE, 2014

**DEDICATORIA**

*Este trabajo va dedicado con todo mi amor, respeto y admiración a mis padres y hermanos, que son el motor de mi vida.*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por darme licencia de poder ver concluido este sueño, pero sobre todo por darme salud y bienestar para poder concretarlo.

A CONACyT por el apoyo económico otorgado durante estos dos años.

A mis padres, Martha Fernández Magaña y Mateo Torres Villalobos, muchas gracias por estar siempre para mí, por apoyarme en mis sueños. Los amo.

A mis hermanos, Adriana, Antonio, Mateo y Martha, gracias por estar conmigo, apoyarme y soportarme en mis momentos de estrés. A pesar de los pleitos, sabemos que son parte de la convivencia diaria. Mi vida no sería la misma sin ustedes. Los amo.

Al Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal, por el apoyo, paciencia, dedicación y conocimientos brindados, pero sobre todo por ayudarme a confiar más en mí, en mis conocimientos, en ser más analítica, y regresarme al buen camino cuando fue necesario.

Al Dr. Francisco Javier Domínguez Mota, muchas gracias por estar presente cuando lo necesité, por la confianza que me ha brindado, por sus conocimientos, paciencia y por todo su apoyo. Por estar en los momentos buenos y malos. Gracias, lo aprecio y estimo mucho.

A mi querido Dr. José Gerardo Tinoco Ruiz, muchas gracias por estar siempre que lo he necesitado, por aguantarme, brindarme su confianza y sobre todo por apoyarme. Gracias, lo quiero mucho.

Al Dr. Víctor Hugo Garduño Monroy, gracias por la confianza depositada en mí y por el apoyo brindado.

A mí querida Dra. Isabel Israde Alcántar, desde el primer día que fui a solicitar información para ingresar al posgrado, me recibió con mucho cariño y me hizo sentir que yo podría formar parte del posgrado, algo que logré en gran parte gracias a su apoyo, siempre me sentí como en familia.

Al Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera y al M.C. Antonio Navarrete, muchas gracias por sus valiosos comentarios a mi trabajo y por el apoyo que me brindaron durante mi formación académica en la maestría.

Al Dr. Alberto Gómez-Tagle, la Dra. Erna López, el Dr. Pedro Corona, el Dr. Miguel Morales, muchas gracias por el apoyo y conocimientos brindados, los cuales ayudaron a mi formación académica. A mis compañeros de la maestría, gracias. A mis amigas, Julia, Aurora y Dulce, chicas gracias por todo, las quiero.

A la gran familia de Matemáticas Aplicadas de la cual forma parte [Lucy] (que como ya se está haciendo costumbre, mi nombre debe ir entre corchetes). Muchas gracias, Belem, Yunnuen, Erika, Gerardo, Fernando, Sanzón, Marco, Jorge, Venegas, Michel. Gracias por cuidarme, regañarme y apoyarme. Gracias por las pláticas, consejos, por esas interminables tazas de café, congresos. Gracias por estar siempre que los necesito, ocupan un lugar muy especial en mi corazón, los quiero.

A Alma Espinoza, te agradezco que siempre me apoyes, tú sabes que siempre cuentas conmigo. Al M. C. Francisco Alarcón Ahumada, gracias por todo. Al M.I. Cuauhtémoc Rivera Loaiza, gracias por apoyarme siempre.

A mis amigos de Morelia que durante estos años, han sido parte importante en todos mis proyectos y logros, en los cuales siempre me han apoyado: Mares, Tea, Zulma, Luz, Lua, Josss, Maggy, Adrix, Armando, Luis, los quiero, muchas gracias por todo. A mi querido Erick, gracias por apoyarme, por estar siempre que te he necesitado, en las buenas y en las malas, sabes que siempre puedes contar conmigo, te quiero.

A mis amigos de Nueva Italia, July, Chuche, Juan, Pablo gracias por estar siempre para mí, los quiero.

A mis abuelit@s, ti@s, prim@s, sobrin@s, cuñadas y a mi mamá Lochita. Gracias por todo.

Muchas gracias a todos y cada uno de ustedes, saben lo importante que son para mí, y que siempre pueden contar conmigo. Los quiero.

Muchas gracias a tod@s mis amig@s que no mencione, pero ustedes son parte importante en mi vida.



*La teoría del azar consiste en reducir todos los acontecimientos del mismo tipo a un cierto número de casos igualmente posibles, es decir, tales que estemos igual de indecisos respecto a su existencia, y en determinar el número de casos favorables al acontecimiento cuya probabilidad se busca. La proporción entre este número y el de todos los casos posibles es la medida de esta probabilidad, que no es, pues, más que una fracción cuyo numerador es el número de casos favorables y cuyo denominador el de todos los posibles.*

Pierré Simon Laplace (1749-1827).



## RESUMEN

El 4 y 5 de febrero del 2010, en el oriente de Michoacán se presentaron lluvias atípicas de larga duración, las cuales afectaron en forma severa el municipio de Mineral de Angangueo. Dichas lluvias representaron el 35.8% de la precipitación media anual, por lo que favorecieron la saturación de los suelos y esto fue determinante para que se detonaran numerosos deslizamientos. La combinación de los deslizamientos y el material acumulado en el fondo de barrancas con el abundante escurrimiento superficial, provocaron la movilización de depósitos en forma de flujos de detritos y flujos de lodo, los cuales afectaron gran parte las viviendas, calles, y el centro de la población. Lamentablemente, hubo tanto pérdidas tanto económicas como humanas.

En este trabajo se analizaron algunos problemas en la zona de estudio que incrementaron la probabilidad de ocurrencia de los deslizamientos, entre los cuales algunos de los principales son la falta de planificación del territorio y la actividad minera, que contribuyen a la generación de nuevos deslizamientos superficiales y a la inestabilidad de laderas.

Es importante señalar que, debido a la falta de planeación, la población regresó a las zonas donde ya se presentaron desprendimientos de material. Es por esta razón que es importante realizar un mapa de susceptibilidad a los deslizamientos y hacer que la población tenga conocimiento de éste. Para lograr lo anterior, se aplicó un método probabilístico que tomó en cuenta diferentes factores condicionantes a partir de los cuales se generaron varios mapas temáticos, y por medio de la superposición de los mismos se obtuvo un mapa de susceptibilidad a nivel municipal. En el mismo se observa que las zonas que presentan mayor peligrosidad son las que tienen pendiente entre 20 y 45 grados, y aquellas cuya concavidad corresponde a la parte media de la ladera, las cuales están orientadas al norte. También las zonas que se encuentran entre 0 y 100 metros de ríos y carreteras, y donde se encuentra el bosque de pino encino.

Ya que la zona es muy propensa a que en cualquier momento se reactive un deslizamiento u ocurra uno nuevo, se recomienda a la población estar alerta y en la medida de lo



posible, evitar asentamientos humanos en zonas que tengan las características mencionadas anteriormente.

**Palabras clave:** Deslizamientos, susceptibilidad, probabilidad condicional.

## ABSTRACT

On February 4th and 5th, 2010, atypical long lasting rainfalls affected severely the town of Mineral de Anganguero, located in the eastern part of Michoacán. These rains accounted for 35.8% of the annual rainfall, which favored the soil saturation and this was the crucial fact that caused numerous landslides. The combination of landslides and accumulated material at the bottom of ravines with abundant surface runoff, caused the mobilization of deposits in the form of debris flows and mudflows, which affected houses, streets, and caused several casualties.

In order to avoid more tragedies in the future, in this thesis the impact of several factors in the study area that increased the probability of occurrence of landslides is studied; among the main ones are the lack of land use planning as well as the mining activities, both of them closely related to the generation of new shallow landslides and slope instability.

Unfortunately, due to the lack of planning, the population is moving back to areas where landslides and material detachment were presented. For this reason it is important to create a map of landslide susceptibilities which people should be aware of. To achieve this goal, a Bayesian probabilistic method that took into account different determinant factors in the thematic maps was carried out, and these approach was applied in order to produce a susceptibility map at the municipal level.

The first conclusions drawn from the analysis are that areas with higher risk are those with slope between 20 and 45 degrees, and those whose concavity corresponds to the middle part of the slope, which are oriented to the north. Zones located between 0 and 100 meters away from rivers and roads, where the pine-oak forest is located, are also risky zones.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

Since the study area is very prone to slipping at anytime, landslide reactivation could easily occurs again, so it is recommended to keep people alert, as far as possible from the risky zones, and to avoid human settlements in them.

**Keywords:** Landslides, susceptibility, conditional probability.



# Contenido

RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	12
1.1 Justificación .....	14
1.2 Hipótesis .....	15
1.3 Objetivo General .....	15
1.3.1 Objetivos Particulares .....	15
CAPÍTULO 2. ZONA DE ESTUDIO.....	16
2.1 Clima .....	18
2.2 Hidrografía .....	19
2.3 Uso de suelo y Vegetación .....	19
2.4 Fisiografía.....	20
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO.....	22
3.1. Inestabilidad de laderas .....	22
3.2. Clasificación de los tipos de deslizamientos.....	23
3.2.1 Caída .....	23
3.2.2 Vuelco .....	23
3.2.3 Deslizamiento rotacional .....	24
3.2.4 Deslizamiento traslacional .....	25
3.2.5 Extensión lateral.....	26
3.2.6 Flujo .....	26
3.2.7 Compuesto.....	27
3.3 Factores Condicionantes y Desencadenantes .....	28
3.4. Zonificación de la susceptibilidad a los fenómenos de la inestabilidad de ladera .....	29
3.4.1 Método Determinístico .....	30
3.4.2 Método Heurístico.....	31
3.4.3 Método Geomorfológico.....	31
3.4.4 Método Probabilístico.....	31
CAPÍTULO 4. ANTECEDENTES .....	34
4.1 Cronología de hechos históricos .....	34
CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA.....	38



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

5.1 Mapa Inventario .....	43
5.2 Mapa Temático de Concavidad .....	45
5.3 Mapa Temático de Pendientes .....	46
5.4 Mapa Temático de Insolación .....	49
5.5 Mapa Temático de Ríos y Carreteras .....	51
5.6 Mapa Temático de Uso de Suelo y Vegetación .....	53
5.7 Mapa de Litologías .....	53
5.8 Probabilidad condicional .....	54
5.9 Teorema de Bayes .....	55
<b>CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>	<b>58</b>
6.1 Mapas Temáticos .....	58
6.1.1 Andesitas .....	67
6.1.2 Ignimbritas .....	68
6.1.3 Depósitos aluviales-coluviales .....	70
6.1.4 Suelos residuales .....	71
6.2 Probabilidad a Priori .....	72
6.3 Cálculo de probabilidades (a priori, condicional y posteriori) .....	86
6.4 Mapa de peligrosidad .....	97
6.5 Discusión .....	98
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>99</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>101</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>106</b>



## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Cada año los procesos de remoción en masa afectan áreas densamente pobladas en todo el mundo. En México, principalmente durante la temporada de lluvias y huracanes, los relieves montañosos son afectados por distintos procesos de remoción en masa, como deslizamientos rotacionales que se convierten en flujos de detritos, hasta llegar a la zona urbana, con tal fuerza que destruyen todo a su paso.

En nuestro país, y en particular en el municipio de Angangueo (oriente de Michoacán), en los primeros días de febrero del 2010 se registró cerca de 35.8% de la precipitación total anual en solo cuatro días (Figueroa, 2013), debido a los frentes fríos No. 28 y 29; y la interacción con la corriente de chorro y otros fenómenos climatológicos que propiciaron la quinta tormenta invernal en el territorio nacional (Aguilar-Garduño, 2010). Las llamadas lluvias Atípicas son las que se presentan en una época del año en la cual no deben de haber lluvias, que normalmente es época seca o de verano. Las lluvias extraordinarias están conceptualizadas en dos formas: una precipitación muy intensa en un solo día (horas), o un fenómeno de lluvias constante cuyo cúmulo constituye un evento extraordinario, y su efecto es la saturación paulatina de agua en el subsuelo donde se llega al punto en que, al no poder absorber éste más humedad, cualquier lluvia posterior provoca una inundación. Para que se considere como viable la cobertura, basta con que se cumpla una de las dos condiciones, es decir, que sea una lluvia extraordinaria en un día o en el acumulado mensual.

Estas lluvias atípicas y extraordinarias detonaron numerosos deslizamientos que al mezclarse con el escurrimiento superficial dieron paso a flujos hiperconcentrados y de detritos (Figueroa, 2013). El arribo de estos flujos de lodo y detritos en la zona urbana fue devastador, ya que provocaron la muerte de 28 personas y dejaron 80% del poblado de Mineral de Angangueo destrozado, por lo que fue declarado zona de desastre natural por la Secretaría de Gobernación (CONAGUA, 2010).

La población inicio a establecer sus viviendas en los márgenes aluviales de los cauces San Pedro, Catingón y Carrillos, esto provocó que hubiera una reducción de la sección



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

hidráulica. En otras palabras esta reducción ha sido producto del crecimiento desordenado de la ciudad, asentando todo tipo de construcciones a lo largo de los ríos. El estrechamiento y rectificación de los cauces antes nombrados originó la obstrucción de los canales y túneles dando pie a la formación de represas compuestas de lodo, piedras y troncos que ocasionaron desbordamientos e inundaciones en varios sectores de Mineral de Angangueo con gran impacto económico (INEGI, 2010), ya que fueron arrastrados todo tipo de objetos desde basura, muebles, herramientas, equipos domésticos e industriales hasta vehículos y maquinaria. Los depósitos de escombros mineros ubicados a lo largo de los cauces fueron un ingrediente extra para incrementar el desastre, ya que además de aportar material de arrastre de diversos tamaños, significan también contaminación por las sustancias químicas agregadas a dichos materiales en los procesos de explotación minera (Figuroa, 2013).

Para evaluar el grado de susceptibilidad a deslizamientos, se aplican aproximaciones matemáticas, las cuales se cimientan en el comportamiento de las laderas.

Las aproximaciones matemáticas fueron determinadas por los factores condicionantes que influyen en la inestabilidad de la ladera, caracterizados por mapas temáticos que se combinan para definir un mapa con los distintos grados de susceptibilidad.

La metodología de este trabajo está basada en la probabilidad condicional desarrollada dentro de un Sistema de Información Geográfico (SIG), en el que se integra la información de todos los factores condicionantes que influyen en las inestabilidades de las laderas.



## 1.1 Justificación

Los deslizamientos de tierra son los fenómenos geomorfológicos que se presentan con mayor frecuencia alrededor de todo el mundo (McGuire et al., 2004). Son fenómenos desencadenados por otros eventos peligrosos y acelerados por la acción del hombre.

Miles de personas mueren cada año por efecto de los deslizamientos. Los daños anuales a la propiedad debido a deslizamientos alrededor del mundo se estiman en decenas de miles de millones de dólares.

En febrero 4 y 5 de 2010, intensas lluvias invernales atípicas desencadenaron deslizamientos de tierra en el municipio de Angangueo, así como otros municipios del Estado de Michoacán, afectando a la población y su infraestructura.

Por esta razón, se pretende elaborar un análisis de los deslizamientos ocurridos e identificar las zonas susceptibles que permita estimar el riesgo y proponer acciones para mitigar la probabilidad de ocurrencia de este fenómeno.

Para identificar, analizar y definir los tipos de deslizamientos y sus zonas de riesgo, se implementó una metodología para modelar el riesgo de deslizamientos a través de una herramienta de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y utilizando el lenguaje de programación MATLAB R2012b.

Este trabajo se realizó con el objeto de profundizar en el diseño de mapas de susceptibilidad a los procesos de remoción en masa, para el municipio de Angangueo, Michoacán. Para llevar a cabo lo anterior se aplicó un Método Probabilístico dado que este ayudó a generar el mapa de susceptibilidad a nivel municipal, lo cual nos muestra las zonas de peligrosidad a deslizamientos.

La importancia de este trabajo estriba en obtener una nueva cartografía a nivel municipal que indique la susceptibilidad del territorio, esto con el fin de evitar daños a futuro, y esta investigación será de gran impacto, ya que en México, es muy poco utilizado el método probabilístico.



## **1.2 Hipótesis**

La inestabilidad de laderas recién registrada en el Oriente de Michoacán en conjunto con su mapa inventario, constituyen elementos estratégicos para el desarrollo de un método probabilístico adecuado a las condiciones recientes de inestabilidad de laderas.

## **1.3 Objetivo General**

Desarrollar un método para la caracterización de la peligrosidad a los PRM, basado en la probabilidad condicional de los eventos ocurridos en febrero del 2010 en el municipio de Angangueo, Michoacán, México.

### **1.3.1 Objetivos Particulares**

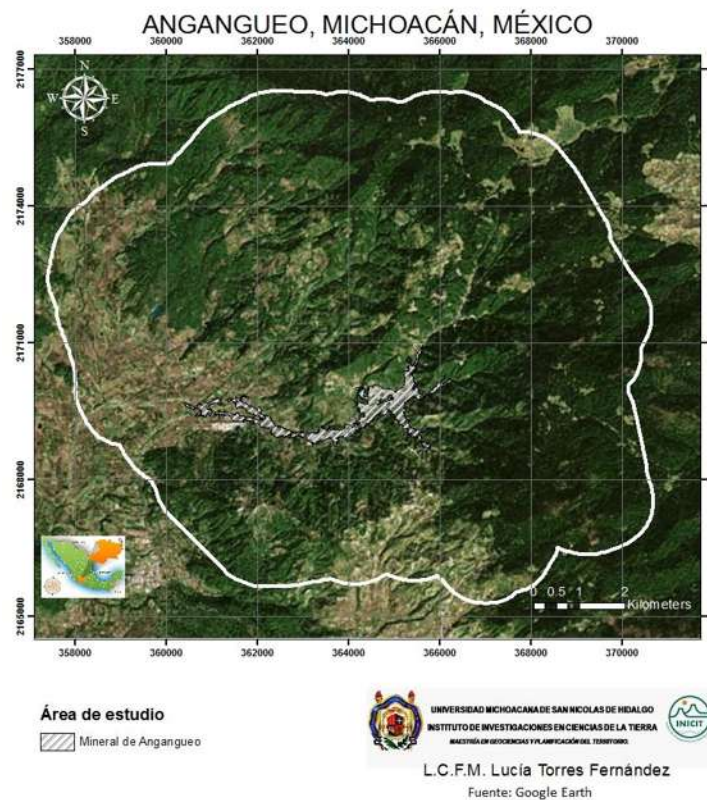
- 1) Construir mapa inventario. El cual consiste en cartografiar los PRM ocurridos en el municipio de Angangueo, Michoacán, tanto del 2010 como deslizamientos antiguos.
- 2) Generar mapas temáticos. Identificar los factores condicionantes para la inestabilidad de laderas.
- 3) Realizar un análisis Probabilístico. Este análisis se basa en calcular, la probabilidad a priori, probabilidad condicional y la probabilidad a posteriori.
- 4) Generar un mapa de peligrosidad. La obtención de este mapa se podrá realizar con la superposición de mapas temáticos.



## CAPÍTULO 2. ZONA DE ESTUDIO

El municipio de Angangueo se localiza al oriente del estado de Michoacán de Ocampo, México. Angangueo se ubica en las coordenadas 19°37" de latitud norte y en los 100°17" de longitud oeste, a una altitud de 2,580 metros sobre el nivel del mar (msnm). Limita al Norte con Senguio, al Este con el Estado de México, al Sur con Ocampo y al Oeste con Aporo. Su distancia a la capital del estado (Morelia) es de 170 km.

La superficie de su territorio municipal es de 85.64 Km<sup>2</sup> (Fig. 2.2) y representa el 0,14% del total del estado (INEGI, 2011). Angangueo se localiza en el Sistema Volcánico Transmexicano, sus principales elevaciones son los cerros de Guadalupe, el del Melón y el de San Pedro.



**Fig. 2.1.** Área de Estudio, Municipio de Angangueo, Michoacán, México. El polígono negro con gris representa la zona urbana, en tanto el polígono externo blanco representa el municipio de Angangueo extendido un kilómetro. La imagen de fondo fue obtenida de Google Earth.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS**  
**MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

Las principales litologías que predominan son andesitas cubiertas por depósitos coluviales y aluviales, así como ignimbritas cubiertas por suelos residuales.

No existe un criterio uniforme en lo referente al significado de la palabra Angangueo, mientras algunos etimologistas afirman que su traducción es "a la entrada de la cueva", otros consideran que viene de la palabra anga y se traduce como "cosa muy alta" e incluso se afirma que significa "dentro del bosque".

El escudo de Angangueo está compuesto por 3 cuarteles (Fig. 2.2): en el primero está el pico, la pala y cuatro lingotes de mineral, lo cual significa la base de la economía y fuente de empleo de ese lugar, con la producción de plata, oro, plomo y fierro, que es la principal producción minera. El segundo cuartel está representado por la mariposa monarca con unas ramitas, siendo una de Pino y otra de Oyamel, que representan a los árboles que dan hospedaje a este insecto para que se reproduzca en sus santuarios, también está representado por las frutas de durazno, membrillo y pera, que son las frutas típicas de la región. El tercer cuartel está representado por los montes y el sol, que indican la cañada en donde surge el pueblo de Angangueo cada día, también está plasmada la iglesia de la Inmaculada Concepción, símbolo de grandeza y orgullo del pueblo, a un lado está representada una vivienda típica de la región en donde predomina la construcción en adobe y techumbre de teja y lámina. En la parte inferior está el listón con la leyenda Riqueza Natural para la Humanidad, siendo el pensamiento del pueblo sin egoísmo, hacia el hombre.

En 1990, la población representaba el 0.3% del total del Estado. Para 1995, se tuvo una población de 9,699 habitantes, su tasa de crecimiento es del 0.5% anual y la densidad de población es de 112.30 habitantes por kilómetro cuadrado. El número de mujeres es relativamente mayor al de hombres. Para el año de 1994, se han dado 332 nacimientos y 61 defunciones. En el año 2000 el municipio contaba con 10,287 habitantes y de acuerdo al II Censo de Población y Vivienda del 2005 el municipio cuenta con un total de 9,990 habitantes. En el 2010 el total de la población era 10,768 de los cuales 5,201 son mujeres y 5,567 son hombres (INEGI, 2010).



Fig. 2.2 Escudo de Angangueo, Michoacán.

## 2.1 Clima

El clima se basa en la clasificación de García (1988), (Garduño, 2013), se describe como semifrío, subhúmedo con verano fresco largo Cb (w2), y con un clima C (w1) en menor proporción, con una temperatura media anual de entre 5°C y 12°C. Para el mes más frío se registran temperaturas entre -3°C y 18°C; mientras que para el mes más cálido la temperatura es menor a 22°C. En lo que respecta a las precipitaciones en el mes más seco se registran hasta 40 mm de lluvia. En cuanto a la precipitación anual promedio es de 910.1 mm.



## 2.2 Hidrografía

Su hidrografía está constituida por los ríos "el Puerco" y "Carrillos" y los arroyos del "Llano de la Papas" y el de "Cantera". (Fig. 2.3).

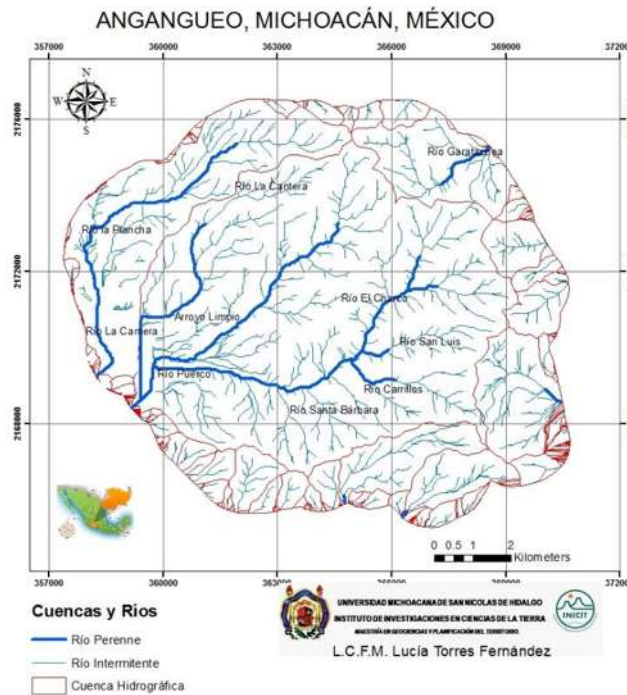


Fig. 2.3 Mapa de los principales ríos en el municipio de Angangueo, Michoacán.

## 2.3 Uso de suelo y Vegetación

El municipio tiene bosques de coníferas, con pino, oyamel y junípero; y bosque mixto, con encino, pino y cedro. En su fauna encontramos: comadreja, conejo, ardilla cacomixtle, zorrillo, tejón, tórtola y pato. En las montañas se recibe anualmente a las mariposas monarca en la Reserva de la Biosfera, siendo esta una de los principales atractivos turísticos. Los principales cultivos son: maíz, trigo, cebada, frijol y haba. Se produce principalmente manzana, durazno, maguey de pulque, pera, perón y capulín. Se cría ganado avícola, bovino, porcino, ovino, caprino, caballo, asnal y mular.

Angangueo tiene su principal actividad económica, es la minería, la cual funciona como una industria extractiva de minerales de cobre, zinc, plomo, hierro, plata y oro (Fig. 2.4). También se producen alimentos y productos metálicos excepto maquinaria y equipo.

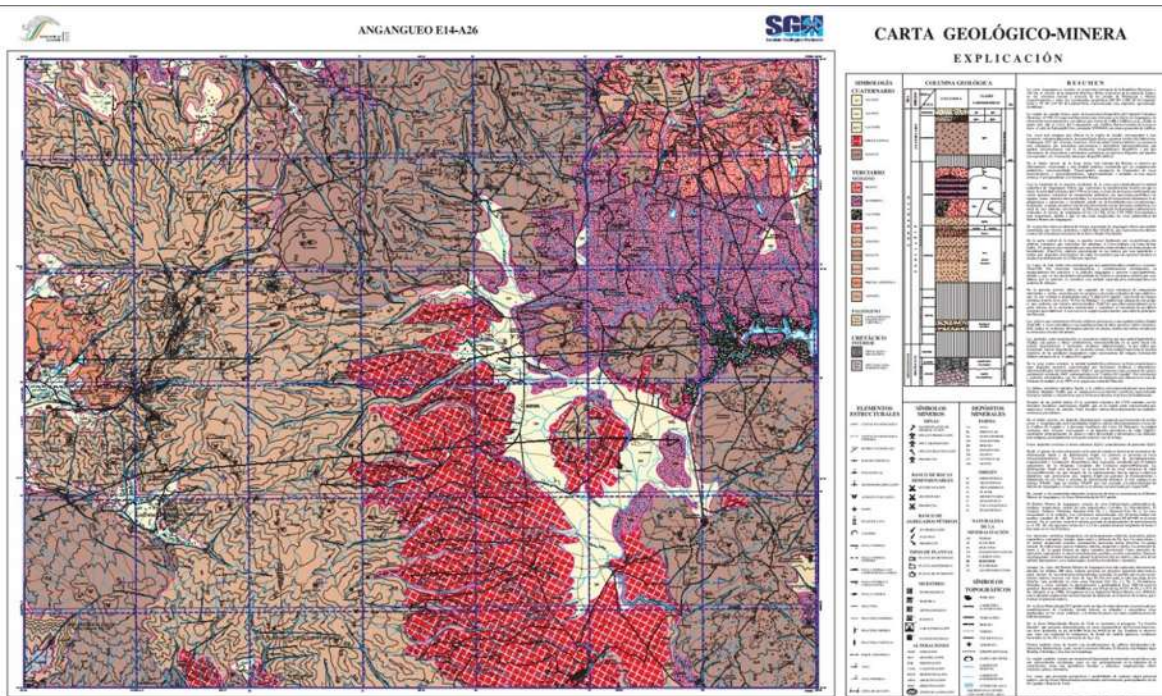


Fig. 2.4 Carta Geológico – Minera (1:50000). Fuente: Servicio Geológico Mexicano.

## 2.4 Fisiografía

El municipio de Angangueo se encuentra dentro de la provincia fisiográfica del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM). La Sierra de Angangueo es el rasgo morfotectónico más representativo de esta zona, de orientación Noroeste-Sureste, con altitudes que varían de los 2,400 a los 3,600 msnm, siendo su punto más alto el Cerro del Campanario con 3,640 msnm.

La Sierra de Angangueo está compuesta por tres conjuntos montañosos: Sierra Chincua, Sierra Rancho Grande y Sierra Campanario.

La Sierra Chincua se localiza en la parte NO de la sierra y está compuesta por materiales andesíticos terciarios cubiertos por depósitos de flujos piroclásticos. En la parte montañosa las pendientes predominantes son superiores a los 15° alcanzando frecuentemente los 35° en varias laderas, mientras que el piedemonte supera siempre los 5° (Ramírez, 2001).



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

La Sierra Rancho Grande-Campanario forma la mayor parte de la mitad sur de la Sierra de Angangueo. Está compuesta por materiales andesíticos del Plioceno. Es un conjunto montañoso de relieve abrupto, con pendientes que oscilan desde los 10° hasta los 25°. En la vertiente occidental estos valores de pendiente con cierta frecuencia llegan a los 35°, incluso más, mientras que en la vertiente oriental eso sólo sucede en pocos sitios muy localizados (Ramírez, 2001).



## CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

### 3.1. Inestabilidad de laderas

Los procesos de remoción de masa (PRM) se producen en vertientes terrestres y submarinas. La remoción de masa puede producirse a un ritmo muy lento, particularmente en las áreas que son muy secas o las zonas que reciben precipitación suficiente para que la vegetación se establezca en la superficie. Asimismo, también puede ocurrir a una velocidad muy alta, como en deslizamientos de rocas y deslizamiento de tierra, con consecuencias desastrosas tanto inmediatas como diferidas.

A nivel internacional los métodos más utilizados son los Probabilísticos (Maris-Moreiras, 2009; Mora-Chinchilla, 2010; Adnan Ozdemir, 2009).

Para evaluar el grado de susceptibilidad del terreno frente a los deslizamientos existen varias aproximaciones basadas en la determinación de los factores que condicionan las roturas. La combinación de estos factores define distintos grados de susceptibilidad, expresándose los resultados de forma cartográfica mediante los mapas de susceptibilidad (Corominas, 1992; Carrara *et al.*, 1995).

Existen diversos factores que intervienen en la generación de los deslizamientos; podemos definir entre factores condicionantes (pasivos) y factores desencadenantes (activos). Los factores desencadenantes son los que generan el deslizamiento, como por ejemplo lluvias torrenciales o eventos sísmicos. Los factores condicionantes son los que “condicionan” el terreno, haciéndolo susceptible a deslizarse, como por ejemplo litologías blandas o rocas muy meteorizadas, el contenido en agua, la inclinación de la ladera, la presencia de arcillas, la existencia de fallas o fracturas previas, etc. Estos factores condicionantes pueden variar su importancia de un área a otra, teniendo algunos de estos factores más influencia en algunos sitios que en otros. Es por ello que no es posible establecer una única ecuación universal para determinar la susceptibilidad frente a deslizamientos, y los estudios deben de realizarse para áreas concretas. Respecto a los diferentes tipos de deslizamientos, en una clasificación general, podemos diferenciar entre deslizamientos rotacionales, flujos y caída de rocas.



### 3.2. Clasificación de los tipos de deslizamientos.

La clasificación de los deslizamientos es una parte muy importante ya que a partir de estos podemos caracterizar la zona. En la literatura existen diferentes clasificaciones, las cuales han sido dadas por diferentes autores. En este trabajo se utilizó la clasificación de Varnes de 1978, ya que es la que mejor describe los deslizamientos que ocurrieron en la zona de estudio.

#### 3.2.1 Caída

Son masas desprendidas de pendientes muy fuertes o escarpes, que se mueven en caída libre, dando tumbos (saltos) o ruedan ladera abajo, el movimiento es muy rápido a extremadamente rápido (Cruden y Varnes, 1996). Todas las caídas se inician con un desprendimiento de suelo o roca de una ladera muy empinada, a lo largo de una superficie en la que poco o ningún desplazamiento cortante se desarrolla.

Solo cuando la masa desplazada es socavada, las caídas son precedidas por pequeños deslizamientos o movimientos de basculamiento que separan el material de la masa no perturbada (Cruden y Varnes, 1996). El socavamiento ocurre típicamente en suelos cohesivos o rocas al pie de escarpes que sufren el ataque de las olas o debido a la erosión de márgenes de ríos.

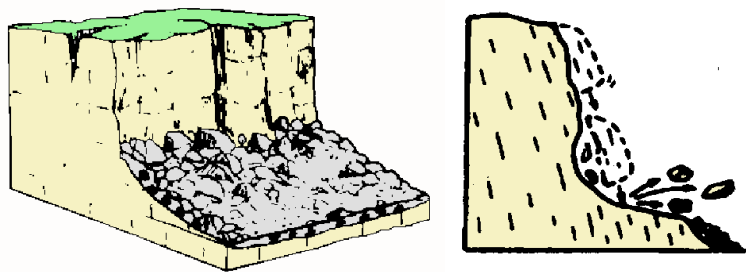


Fig. 3.1 Caída de rocas (Varnes, 1978).

#### 3.2.2 Vuelco

Un basculamiento o volcamiento es la rotación hacia adelante (afuera) de una masa de suelo o roca, alrededor de un punto o eje bajo el centro de gravedad de la masa desplazada (Cruden y Varnes, 1996).



El basculamiento algunas veces es causado por el empuje del material localizado ladera arriba y otras veces por el agua presente en las grietas del macizo (Cruden y Varnes, 1996).

Los basculamientos producen caídas o deslizamientos posteriores del material desplazado, dependiendo de la geometría del material en movimiento, la geometría de la superficie de separación y la orientación y extensión de las discontinuidades cinemáticamente activas (Cruden y Varnes, 1996). Los basculamientos varían de extremadamente lentos a extremadamente rápidos, algunas veces se aceleran con el avance del movimiento (Cruden y Varnes, 1996).

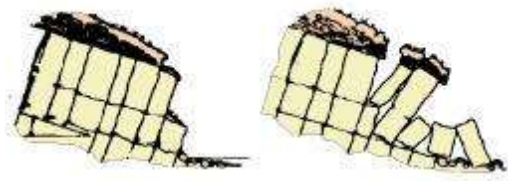


Fig. 3.2 Basculamiento de columnas de roca.

### 3.2.3 Deslizamiento rotacional

Los Deslizamientos se desplazan a lo largo de uno o más planos discretos. Pueden ser rotacionales o traslacionales en su movimiento. Un deslizamiento es un movimiento ladera abajo de una masa de suelos o rocas, que ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de ruptura o zonas relativamente delgadas de intensa deformación cortante. Inicialmente, el movimiento no ocurre simultáneamente a lo largo de lo que, eventualmente, será la superficie de ruptura; el volumen de material desplazado se incrementa a partir de un área de falla local (Cruden y Varnes, 1996).

Muchas veces, los primeros signos de movimiento son grietas en la superficie original del terreno, a lo largo de lo que más tarde será el escarpe principal del deslizamiento. El material desplazado puede deslizarse más allá de la punta de la superficie de ruptura, cubriendo la superficie original del terreno, la cual, a su vez, se convierte en superficie de separación (Cruden y Varnes, 1996).



El movimiento rotacional se da donde la superficie de ruptura es curva, la masa rota hacia atrás alrededor de un eje paralelo a la ladera.

Estos deslizamientos se mueven a lo largo de superficies de ruptura curvas y cóncavas, con poca deformación interna del material. La cabeza del material desplazado se mueve verticalmente hacia abajo, mientras que la parte superior del material desplazado se bascula hacia el escarpe. El escarpe principal es prácticamente vertical y carente de soporte, por lo que se pueden esperar movimientos posteriores que causen retrogresión del deslizamiento a la altura de la corona. Ocasionalmente, los márgenes laterales de la superficie de ruptura pueden ser lo suficientemente altos y empinados, como para producir deslizamientos hacia la zona que ha sido desprendida (Cruden y Varnes, 1996).

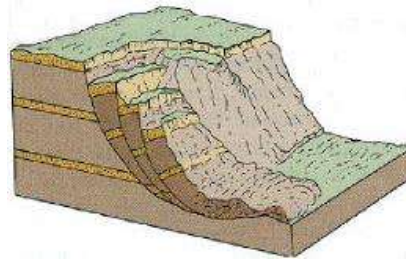


Fig. 3.3 Deslizamiento rotacional (Skinner y Porter, 1992)

### 3.2.4 Deslizamiento traslacional

El movimiento traslacional se da cuando la superficie de ruptura es más o menos planar o suavemente ondulante y la masa se mueve paralela a la superficie del terreno. La masa se desplaza a lo largo de una superficie de ruptura plana o suavemente ondulada y superponiéndose a la superficie original del terreno (Cruden y Varnes, 1996). La superficie de ruptura usualmente se orienta a lo largo de discontinuidades como fallas, juntas, planos de estratificación o el contacto entre roca y suelos residuales o transportados (Cruden y Varnes, 1996). En los deslizamientos traslacionales la masa desplazada puede también fluir, convirtiéndose en un flujo de detritos ladera abajo.

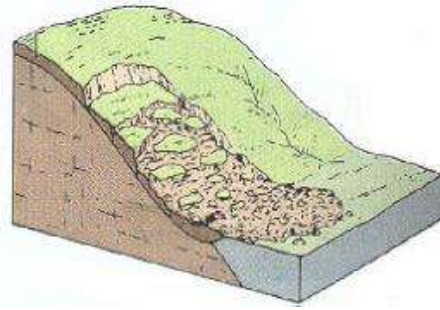


Fig. 3.4 Deslizamiento traslacional (Skinner y Porter, 1992)

### 3.2.5 Extensión lateral

Movimiento de extensión lateral acompañado por fracturamiento cortante o tensional. La separación lateral se define como una extensión de una masa cohesiva de suelo o roca, combinada con la subsidencia del material fracturado en un material subyacente más blando (Cruden y Varnes, 1996). La superficie de ruptura no es una superficie de corte intenso y el proceso es el producto de la licuefacción o flujo (extrusión) del material más blando. Claramente estos movimientos son complejos, pero debido a que son muy comunes en ciertos materiales y situaciones geológicas, es mejor reconocerlos como un tipo separado de movimiento (Cruden y Varnes, 1996).

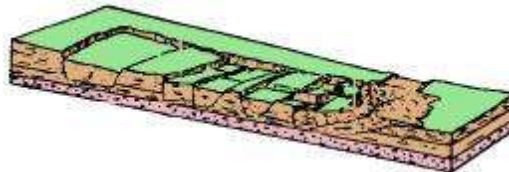


Fig. 3.5 Separación lateral (Varnes, 1978).

### 3.2.6 Flujo

Los flujos son masas que se mueven como unidades deformadas, viscosas, sin un plano discreto de ruptura. Un flujo es un movimiento espacialmente continuo, en el que las superficies de corte son de corta duración, de espaciamiento corto y usualmente no se preservan; la distribución de velocidades en la masa que se desplaza se compara con la de un fluido viscoso (Cruden y Varnes, 1996).

El límite inferior de la masa desplazada puede ser una superficie, a lo largo de la cual se desarrolla un movimiento diferencial apreciable o una zona gruesa de corte distribuido. Es



decir, existe una gradación de deslizamientos a flujos, dependiendo del contenido de humedad, la movilidad y la evolución del movimiento (Cruden y Varnes, 1996).

Los deslizamientos de detritos pueden convertirse en flujos de detritos extremadamente rápidos o avalanchas de detritos, en la medida en que el material desplazado pierde cohesión, aumenta su contenido de humedad o encuentra pendientes más fuertes (Cruden y Varnes, 1996).

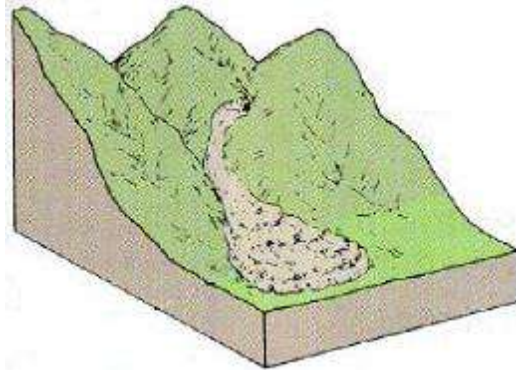


Fig. 3.6 Flujo de detritos (Skinner y Porter, 1992)

### 3.2.7 Compuesto

Algunos deslizamientos pueden presentar más de un tipo de movimiento, en este caso se describen como complejos.



### 3.3 Factores Condicionantes y Desencadenantes

Los factores condicionantes y desencadenantes son desplazamientos de materiales en las laderas inducidos por la gravedad. Existen una serie de factores que favorecen estos movimientos, son los factores condicionantes.

Otros factores que desencadenan estos movimientos se les denomina: factores desencadenantes.

#### FACTORES CONDICIONANTES

##### ➤ LITOLÓGICOS

- Presencia de materiales alterados por meteorización o secuencias arcillosas, carbonosas o de evaporitas.
- Falta de cohesión de los materiales que componen la roca.
- Alternancia de estratos de diferente naturaleza

##### ➤ ESTRUCTURALES

- Disposición paralela de los planos de estratificación de las rocas respecto de la pendiente.
- Fallas o fracturas con planos a favor de la pendiente del terreno.

##### ➤ CLIMÁTICOS

- Alternancia de épocas de sequía-lluvia; hielo-deshielo.

##### ➤ HIDROLÓGICOS

- Aumento de la escorrentía superficial.
- Estancamiento del agua
- Cambios del nivel freático de las aguas subterráneas.
- Alternancia de estratos de diferente permeabilidad.

##### ➤ TOPOGRÁFICOS

- Cualquier pendiente mayor de 15%, conlleva riesgos de erosión.

##### ➤ VEGETACIÓN

- Ausencia o escasez de vegetación que sujete el terreno.



### FACTORES DESENCADENANTES (precipitaciones, sismos y actividad humana)

#### ➤ PRECIPITACIONES

- Intensas precipitaciones.
- Inundaciones.
- Cambios en el volumen del terreno por hielo-deshielo o humedad-deseccación.

#### ➤ SISMOS

- Erupciones volcánicas.
- Sismos y Terremotos.

#### ➤ ACTIVIDAD ANTRÓPICA

- Aumento del peso del talud (pendiente) por acumulación de escombros o construcciones.
- Excavaciones con retirada de materiales del pie del talud.
- Creación de taludes artificiales.
- Inundaciones causadas por roturas de presas.
- Estancamientos de aguas por impermeabilización y asfaltado.
- Encharcamientos por excesos de riego.
- Deforestación de taludes.
- Explosiones realizadas en la construcción de carreteras, minas, etc.

### 3.4. Zonificación de la susceptibilidad a los fenómenos de la inestabilidad de ladera

La susceptibilidad está definida como la propensión o tendencia de una zona a ser afectada o encontrarse bajo la influencia de un PRM determinado. La estimación de la susceptibilidad se basa en la correlación de los principales factores (intrínsecos) que contribuyen en la formación de PRM.

Los mapas de susceptibilidad, se realizan a partir de datos cartográficos de tipo topográfico, geomorfológico, litológico estructural, vegetación, usos de suelos y otros. Parten del análisis de los factores presentes en los movimientos existentes, para, extrapolando los resultados de este análisis, determinar el mapa de susceptibilidad (Ayala-Carcedo y Coraminas, 2003).



Cabe destacar que los mapas de susceptibilidad a los PRM, si bien identifican áreas donde se pueden generar potencialmente tales procesos, en ellos no figura la totalidad de zonas a ser afectadas, ni predicen cuando ocurrirán los procesos analizados. Una de sus funciones más relevantes es indicar las zonas donde se hace necesaria la realización de estudios más específicos y a mayor detalle (áreas críticas). Sin embargo, se debe considerar que los límites de susceptibilidad señalados deben tomarse como referencia y no como valores absolutos.

A nivel nacional hay muy pocos trabajos realizados utilizando estos métodos, por ejemplo se han utilizado: método Geomorfológico (Álcantara-Ayala, et al., 2007; García-Palomo, et al., 2006; Capra, et al., 2006; Hinojoza-Corona, et al., 2011); método Heurístico (Muñiz-Jauregui y Hernández-Madrigal, 2012); método Determinístico (Ochoa-Tejeda, 2007; Hernández-Madrigal, et al., 2006).

Existen diversos métodos de evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos a través de SIG. Soeters y Van Westen (1996), Aleotti y Chowdhury (1999), Guzzetti et al. (1999), entre otros autores, proporcionan una amplia visión de los más utilizados, entre los que se incluyen principalmente los métodos: Determinístico, Heurístico, Geomorfológico y Probabilístico.

La aplicabilidad de cada método a una zona determinada depende sobre todo de las características y extensión de dicha zona, del tipo y extensión de los PRM existentes.

#### **3.4.1 Método Determinístico**

Este se utiliza para el estudio de la estabilidad de una ladera o talud concreto. Se fundamentan en métodos basados en el equilibrio límite o en modelos numéricos.

Este método muestra un grado de fiabilidad alto si los datos son correctos. Su principal inconveniente es su baja idoneidad para zonificaciones rápidas y de extensas áreas (Van Westen, 1993). Este método es más usual y se aplica para deslizamientos traslacionales utilizando el modelo de talud infinito (Ward et al., 1982; Brass et al., 1989; Murphy y Vita-Finzi, 1991; Okimura y Kawatani, 1986).



#### **3.4.2 Método Heurístico**

Se basa en el conocimiento a priori de los factores que producen inestabilidad en el área de estudio. Los factores son ordenados y ponderados según su importancia asumida o esperada en la formación de deslizamientos (Carrara et al., 1995).

El principal inconveniente radica en que en la mayor parte de los casos, el conocimiento disponible entre los factores ambientales que pueden causar inestabilidad y los deslizamientos es inadecuado y subjetivo, dependiendo de la experiencia del experto. El análisis heurístico introduce un grado de subjetividad que imposibilita comparar documentos producidos por diferentes autores.

#### **3.4.3 Método Geomorfológico**

Se basa en la determinación de condiciones de inestabilidad de ladera mediante técnicas geomorfológicas, cartografía.

La principal ventaja es la validez, detalle del análisis y mapa resultantes, si se realizan por un buen experto. El inconveniente de estos métodos es el alto grado de subjetividad dependiente de la experiencia del autor. La elaboración de estos mapas exige conocer la morfología y tipología de movimientos (Hansen, 1984; Hansen y Frank, 1991).

#### **3.4.4 Método Probabilístico**

Una de las desventajas en el análisis de estabilidad es la alta variabilidad de las propiedades de los suelos. Esta heterogeneidad puede atribuirse a las diferentes condiciones de deposición de los suelos y las diferentes historias de esfuerzos a los que han estado expuestos. Los análisis probabilísticos proveen una excelente herramienta para tomar en cuenta la variabilidad en las propiedades de los suelos y para desarrollar algoritmos racionales para estimar los parámetros de diseño mediante probabilidades donde el nivel de riesgo asociado puede cuantificarse (Elkateb, et al., 2003).

Este método se cimienta en las relaciones observadas entre cada factor y la distribución de deslizamientos actual y pasada (Carrara et al., 1995). Se utiliza cuando se dispone de abundante información, tanto cualitativa como cuantitativa. El análisis cuantitativo trabaja con modelos estadísticos a partir de la relación que existe entre diversos factores y la



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

distribución de los deslizamientos ocurridos. Con ello se puede predecir futuros deslizamientos en zonas donde se presentan condiciones similares (Turner, 1996).

Este método tiene como desventaja que requiere una gran información histórica o de un evento específico y que asume una densidad de deslizamientos continua en el espacio (Suarez, 1998). Existen dos modelos estadísticos que pueden ser univariantes y multivariantes para el estudio de peligros por procesos de remoción en masa:

El Análisis Estadístico Univariante combina cada factor con el mapa de distribución de deslizamientos, otorgando pesos basados en la densidad de los deslizamientos y realiza el cálculo para cada clase.

El Análisis Estadístico Multivariante, combina todos los factores relevantes. De esto resulta una matriz que es analizada por medio del uso de regresión múltiple o análisis discriminante.

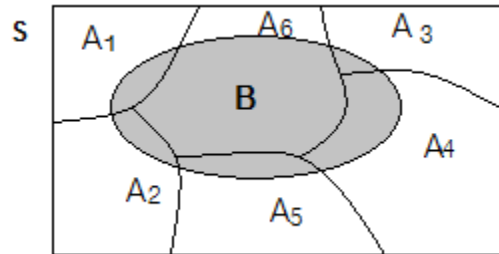
La principal ventaja es la objetividad del método. El costo de la adquisición de algunos factores relacionados con la inestabilidad de laderas es el principal inconveniente. Dentro de este grupo se encuentran los métodos estadísticos y el análisis de frecuencia de deslizamientos. Son métodos indirectos cuyos resultados se pueden extrapolar a zonas distintas para estimar la susceptibilidad, con condiciones geológicas y climáticas homogéneas. Los métodos estadísticos univariantes se dividen en dos grupos: los que utilizan el análisis condicional y los que no lo utilizan.

El análisis condicional, trata de evaluar la relación probabilística entre diversos factores relevantes para las condiciones de inestabilidad y la ocurrencia de deslizamientos. Se basan en la superposición de uno o más factores con el mapa de distribución de deslizamientos, para obtener una probabilidad condicionada de cada factor a la presencia o ausencia de deslizamientos (Chung y Fabbri, 1993; Chung y Leclerc, 1994).

Los resultados se interpretan en términos de probabilidad según el teorema de Bayes (Morgan, 1968; Chung y Leclerc, 1994), certeza (Heckerman, 1986; Luzi y Fabbri, 1995), según conjuntos difusos (Zadeh, 1965, 1978; MahdaviFar, 2000) o según plausibilidad (Shafer, 1976).



Una de las principales aplicaciones de la probabilidad condicional es el Teorema de Bayes, el cual considera la suposición de que el espacio muestral está dividido en varios eventos simples  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  mutuamente excluyentes y su unión es todo el espacio muestral. Ahora sea otro evento  $B$ , entonces el conjunto se puede formar con las intersecciones de los eventos simples  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ , esto lo podemos observar en la siguiente imagen:



Supongamos que  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  es una partición del espacio muestral  $S$  y que  $B$  es cualquier evento. Entonces para cualquier evento  $A_i$

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{\sum_{k=1}^n P(B|A_k)P(A_k)}$$

Donde  $A_i$  son los factores condicionantes divididos en clases y el evento  $B$  es el mapa inventario.

El análisis Bayesiano es sumamente importante en este trabajo. Una vez que se obtuvieron los resultados para cada factor condicionante, de:

- Pendiente de la ladera
- Infraestructura carretera
- Radiación solar
- Concavidad de la ladera
- Uso de suelo y vegetación
- Litología
- Ríos en la zona de estudio

Se procedió a integrar toda la información en el SIG y de esta manera poder obtener el mapa de susceptibilidad para la zona de estudio.



## CAPÍTULO 4. ANTECEDENTES

### 4.1 Cronología de hechos históricos

En la zona de estudio se han realizado distintos trabajos de investigación, los cuales se han llevado a cabo con diferentes enfoques, pero todos han sido para ayudar a mitigar los daños que han ocasionado los deslizamientos presentados.

Se han publicado artículos periodísticos, artículos científicos y tesis de licenciatura, maestría, prácticas de residencias, en los cuales hablan del fenómeno ocurrido en el municipio de Angangueo, Michoacán. Este fenómeno fue de gran impacto, ya que dentro de los artículos publicados se encuentran algunos realizados por investigadores extranjeros. Pero, gran parte de los trabajos realizados en la zona han sido por parte de Investigadores de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Tenemos el trabajo titulado “Identificación de eventos excepcionales, a través de análisis de anillos de crecimiento de los árboles en el margen de los ríos Catingón y San Pedro en Angangueo, Michoacán, México” (Garduño, 2013), el cual se resume de la siguiente manera:

En base al crecimiento de los anillos de los árboles, se pueden identificar algunos eventos ocurridos, pero especialmente por la forma del anillo se puede determinar si hubo algún deslizamiento en el pasado, ya que este tiende a deformar el anillo de crecimiento del árbol.

También se realizó el trabajo titulado “Estudio del peligro por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas mediante simulación numérica en Flo-2D, Caso De Estudio: Angangueo, Mich” (Figueroa, 2013). El cual tenía como objetivo evaluar el daño en las zonas afectadas y elaborar un mapa de peligro por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas provenientes de la microcuenca del río San Pedro, en este trabajo se realizó la modelización matemática de dichos procesos, mediante el programa numérico FLO-2D versión 2009.06.

Los resultados de las modelaciones en FLO-2D revelan tres zonas de conflicto tanto para el flujo netamente líquido como para el flujo de detritos. La primera zona se ubica justo a la



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

entrada de la ciudad, en el último cambio de dirección que presenta el río San Pedro; la segunda zona en el puente que intersecta a la calle Libertad y que conduce al Monumento del Minero (calzada Álvaro Obregón); y la tercera en la intersección de la calle Melchor Ocampo con el canal del río San Pedro. En estas zonas los modelos revelan un incremento importante en los tirantes, las velocidades, las fuerzas de impacto y las presiones estáticas. El incremento de dichas variables dinámicas del flujo se vio reflejado en la primer zona con un deslizamiento rotacional en el flanco izquierdo del río, desbordamientos e inundaciones en la zonas 2 y 3, siendo éstas dos últimas las zonas que sufrieron mayores daños durante el evento. En base a resultados de FLO-2D se elaboró un mapa preliminar de peligro por inundaciones y flujo de detritos para un evento similar al de febrero de 2010. Este mapa muestra que las áreas de mayor peligro se ubican, por obvias razones en los márgenes del río-canal San Pedro, calle Melchor Ocampo y Av. Nacional-Independencia; y con peligrosidad media-baja la calle Libertad y calles perimetrales del atrio del templo de la Inmaculada Concepción de María. Todo ello concordante con el escenario crítico registrado en febrero del 2010 por lo que el modelo es aceptable. (Figueroa, 2013).

Se han realizado otros estudios en el área, pero estos dos son los más recientes, ya que han sido realizados con el objetivo de mitigar los daños y que sean de ayuda para la población. Por otra parte tenemos trabajos realizados en zonas cercanas al municipio de Angangueo. Como es el trabajo de prácticas de residencias titulado “Inventario de flujos de detritos y su relación con la hidrografía y geología en la cuenca del río Tuzantla, Mich.” (Núñez, 2012). Este trabajo se enfocó en el análisis de flujos de detritos en base a la identificación y conteo de los deslizamientos presentados en esa zona. Estos deslizamientos fueron clasificados e identificados en base a criterios de campo los cuales se relacionaban con los fenómenos geológicos e hidrológicos presentados y así poder establecer el nivel de peligrosidad de los deslizamientos.

En el trabajo titulado “Caracterización geomorfológica de deslizamientos en la cuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán” (Bermúdez, 2012), la caracterización de los deslizamientos se llevó a cabo, utilizando el método geomorfológico. Esto se pudo lograr



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

en base a un levantamiento topográfico a detalle de la zona, cartografía de los PRM y trabajo de campo.

Otros trabajos realizados han sido en base a la cartografía del uso de suelo y vegetación, pero estos han sido elaborados antes del desastre del 2010.

Cabe señalar que un trabajo sumamente interesante es el que se titula “Análisis y definición de tipos de deslizamientos y sus zonas de susceptibilidad en la microcuenca el Ventilados, Angangueo, Michoacán, México” (De la Luz, 2011). Lo que llama la atención de este trabajo es que se realizó un análisis de distintos factores condicionantes de los PRM y aplicaron un análisis jerárquico para poder determinar la susceptibilidad. De esta manera determinaron que gran parte de la población se encuentra en un rango de valores Muy alta, Alta y Mediana Vulnerabilidad. Para dicho análisis no estimaron la intensidad de peligro por deslizamiento, sino que hicieron una evaluación de los factores condicionantes. Se basaron en esta clasificación:

***Escala sugerida de amenaza en laderas para deslizamientos (CENAPRED, 2006) y adaptada para la microcuenca “El Ventilador”, Angangueo, Michoacán.***

<b>Muy alta</b>	Laderas con agrietamientos, escarpas o salientes. Suelos muy alterados, sueltos y / o saturados. Presencia de discontinuidades desfavorables. Antecedentes de deslizamientos en el área o sitio. Laderas perturbadas. Pendientes empinadas y muy inclinadas.
<b>Alta</b>	Laderas que exhiben zonas de falla. Meteorización de moderada a alta. Pose discontinuidades desfavorables, donde han ocurrido deslizamientos. Laderas perturbadas. Pendientes empinadas y muy inclinadas.
<b>Media</b>	Laderas con algunas zonas de fallas. Formaciones rocosas con alteración y agrietamientos moderados. Con antecedentes menores de deslizamientos. Laderas menos alteradas. Pendientes muy inclinadas y fuertemente inclinada.
<b>Baja</b>	Laderas en formaciones rocosas con alteración de baja a moderada. Planos de discontinuidades pocos favorables al deslizamiento. Con antecedentes escasos o nulos de deslizamientos. Laderas poco perturbadas. Capa de suelos compactos de poco espesor. Pendientes Ligeramente inclinadas o planas.
<b>Muy baja</b>	Laderas en formaciones rocosas no alteradas, poco agrietadas o fisuradas. Sin planos de discontinuidad que favorezcan el deslizamiento. Sin antecedentes de deslizamientos. Ladera sin perturbación. Pendientes ligeramente inclinadas o planas.

Fig. 4.1 Imagen tomada de la tesis de De la Luz, 2011.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

En base a esta clasificación y comparándola con el mapa inventario que cartografiaron en la zona, obtuvieron resultados muy buenos sobre la identificación de las zonas susceptibles a que haya un PRM.

Mediante el análisis probabilístico, se pueden tener mejores resultados para un mapa de susceptibilidad, es por esto, la razón de realizar este trabajo, ya que en México, hasta el momento y en la bibliografía consultada, no se han realizado trabajos que utilicen el método probabilístico. En el municipio de Angangueo, Michoacán, México, es muy importante realizar este tipo de trabajo, ya que la probabilidad nos ayudará a identificar las zonas que tiene n mayor peligrosidad y a partir de ahí tomar precauciones. Es decir, la probabilidad nos ayuda a ver numéricamente las zonas que son propensas a que ocurra un desprendimiento de material.

Muchas veces, los tomadores de decisiones, se basan en resultados numéricos, es por eso que debemos de tratar de implementar más el análisis probabilístico en futuras investigaciones.



## CAPÍTULO 5. METODOLOGÍA

Para poder obtener los resultados que se reportan, cada uno de los mapas temáticos se dividieron en clases, las cuales se refieren a la forma en cómo se dividió cada uno de los mapas temáticos, para poder realizar el análisis probabilístico. En estas se calcularon primero las áreas de cada una de ellas. Esto fue utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcGis 10, en el cual se pudieron calcular las áreas afectadas de cada clase, haciendo la intersección de cada uno de los mapas temáticos con el mapa inventario que contiene los escarpes de cada uno de los deslizamientos presentados en la zona de estudio. Después de obtener esas áreas, se hicieron los cálculos en MATLAB para poder obtener los resultados mostrados en cada tabla, los cuales solo son para cada uno de los mapas temáticos.

El presente trabajo se desarrolló en base a 4 etapas:

- Construir mapa inventario.
- Generar mapas temáticos.
- Realizar un análisis probabilístico.
- Generar un mapa de peligrosidad.

El método que utilizamos para la evaluación del riesgo en Angangueo, es el probabilístico, bajo la modalidad de la probabilidad condicional que nos permitió llegar al objetivo de nuestro trabajo.

No tiene por qué haber una relación causal o temporal entre  $A$  y  $B$ .  $A$  puede preceder en el tiempo a  $B$ , antecederlo o pueden ocurrir simultáneamente.  $A$  puede causar  $B$  o viceversa, o pueden no tener relación causal. Las relaciones causales o temporales son nociones que no pertenecen al ámbito de la probabilidad. Pueden desempeñar un papel o no dependiendo de la interpretación que se le dé a los eventos. Dado un espacio de probabilidad  $(\Omega, F, P)$  y dos eventos (o sucesos)  $A, B \in F$  con  $P(B) > 0$ , la probabilidad condicional de  $A$  dado  $B$  está definida como:

$$P(A | B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}.$$

En este trabajo de investigación la variable  $A$  representa el mapa inventario y  $B$  representa el área de cada una de las clases en las que se dividió cada mapa temático.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

Existen cuatro procedimientos utilizados en la evaluación y obtención de mapas de susceptibilidad del terreno: métodos determinísticos, heurísticos, geomorfológicos y probabilísticos.

El método que se utilizó en este trabajo fue el probabilístico multivariante utilizando probabilidad condicional y mediante este, calcular las probabilidades y generar un mapa de susceptibilidad para la zona mencionada.

Dentro de los mapas de temáticos también se construyó un mapa inventario en el cual se registró donde se han presentado los deslizamientos, en específico los deslizamientos presentados en el 2010 en Angangueo, Michoacán.

Una forma de establecer el grado de incidencia que tiene un factor o variable de inestabilidad de laderas, se obtuvo mediante la superposición del mapa inventario de los procesos de remoción en masa con mapas temáticos de los factores que condicionan las laderas.

La importancia relativa de cada variable con respecto a la distribución de los Procesos de Remoción en Masa (PRM) es analizada mediante la relación entre las áreas afectadas por los procesos gravitacionales para cada clase (mapa temático) y el área total que ocupa dicha clase (área de estudio). El área de cada categoría afectada por procesos de remoción en masa se obtendrá a partir de la superposición de capas del mapa temático correspondiente y el mapa inventario de los Procesos de Remoción en Masa.

La metodología consta de 5 etapas:

- 1)** Elaborar un mapa inventario de Procesos de Remoción en Masa (PRM). Cartografiado en base a fotografías aéreas y de satélite se identificaran los PRM en la zona, en el cual se muestra el escarpe y el depósito del material.
- 2)** Identificar los factores condicionantes que intervienen en la inestabilidad de laderas. Con base en recorridos en campo se identificaron dichos factores.
- 3)** Representar los factores condicionantes en un SIG generando los siguientes mapas temáticos: inventario, altitud, pendiente, insolación, carretera, ríos, uso de suelo, concavidad, geología, los cuales se construyeron, editaron y analizaron en formato ráster.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

- 4) Se utilizó probabilidad condicional para obtener el mapa de susceptibilidad de un deslizamiento y unificar los datos obtenidos, dichos datos se obtuvieron utilizando un código en MATLAB, con el cual se calculó la probabilidad condicional y a posteriori para cada mapa temático.
- 5) Validar los resultados. Se verificaron los datos obtenidos en el SIG.

La superposición del mapa inventario con cada mapa temático se realizó en ArcGis 10, el cual es un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Los pasos para llevar a cabo la metodología en este trabajo de investigación se desarrolló de la siguiente manera (Fig. 5.1), en la primera parte del trabajo se describe el fenómeno ocurrido en Angangueo, Michoacán del 2010, lo cual se encuentra documentado en la literatura mediante artículos publicados, tesis realizadas en la zona, y en artículos periodísticos; durante esta parte se realizó la consulta necesaria para poder documentar el trabajo. En la segunda etapa se cartografiaron los PRM ocurridos en el 2010, esto en base a imágenes de satélite (Geoeye de 0.5 m de resolución), en las cuales, también se cartografiaron algunos deslizamientos antiguos dando como resultado el mapa inventario de deslizamientos. En la tercera etapa se hizo una identificación de los factores condicionantes a partir de los cuales se generaron los mapas temáticos necesarios para la realización de este trabajo. En la cuarta etapa, después de generar y adquirir los mapas temáticos se hizo una revisión y actualización de ellos. En la quinta etapa se procedió a aplicar el método probabilístico el cual consistió en hacer un análisis de cada uno de los factores condicionantes, en primer lugar se calculó la probabilidad a priori la cual nos mostró cual es la clase que más se repite; después en MATLAB se calculó la probabilidad condicional, esta fue tomando en cuenta la intersección del mapa inventario con cada una de las clases de los mapas temáticos; finalmente se calculó la probabilidad a posteriori, esta nos indica que clase tiene la mayor probabilidad de ocurrencia en base a este análisis. En la séptima etapa, una vez obtenidos los resultados para cada factor condicionante, se procedió a integrar toda la información, y así poder generar un mapa de susceptibilidad a nivel municipal. Una vez obtenidos los resultados se validaron en campo.



Fig. 5.1 Metodología aplicada en el trabajo de investigación.

Un insumo importante para la obtención del mapa temático de pendientes, concavidades e insolación, es el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), el cual fue obtenido de la página del INEGI. Este MDE tiene una resolución de 15 m.

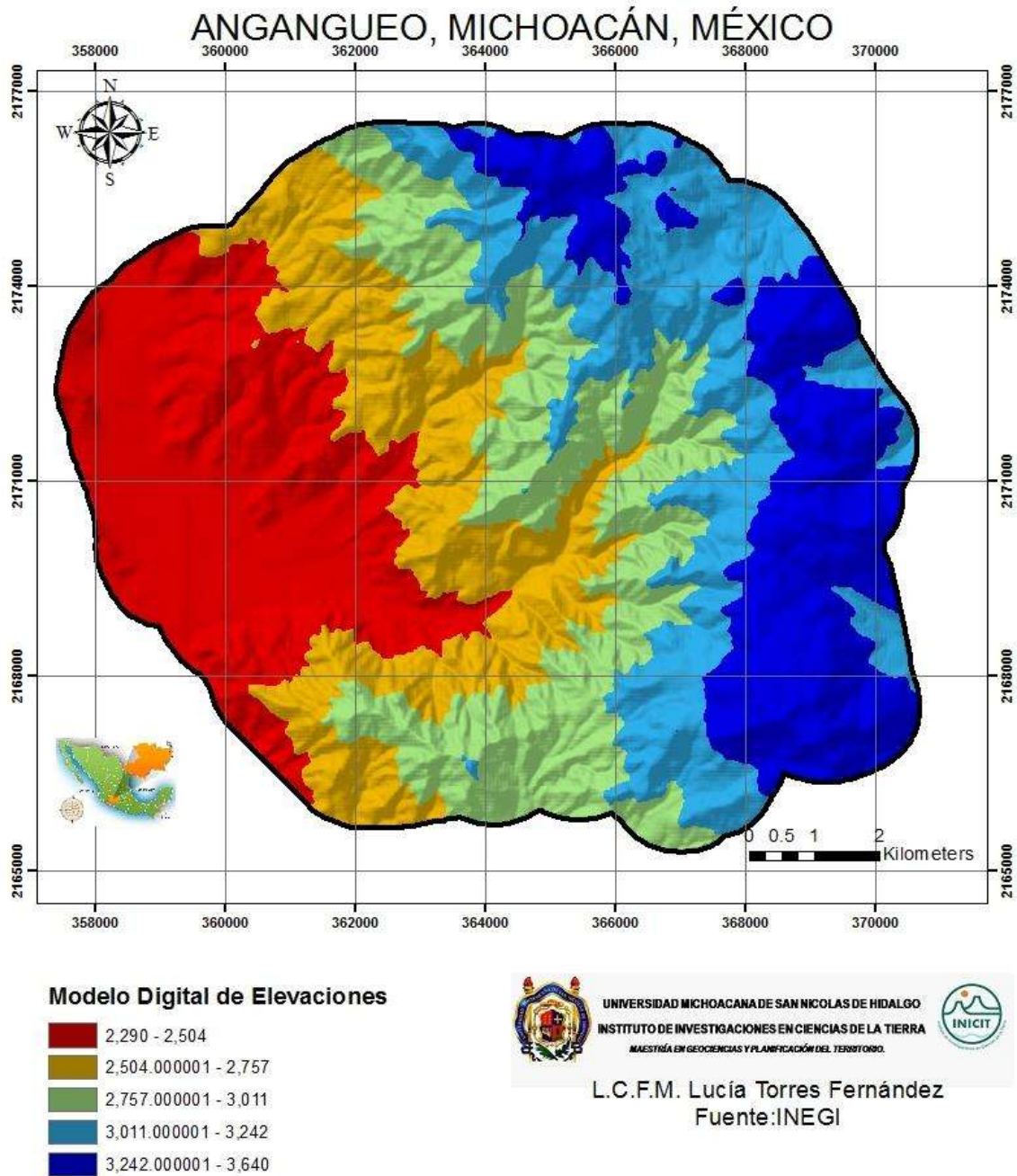


Fig. 5.2 Modelo Digital de Elevaciones (MDE)



## 5.1 Mapa Inventario

La identificación de los movimientos de masas presentes en el área de estudio se realizó mediante la fotointerpretación para ubicar y caracterizar los deslizamientos existentes y crear el mapa de inventario. Se utilizaron imágenes de satélite (Geoeye de 0.5 m de resolución) con una resolución de 0.5 m, a una escala 1:20000.

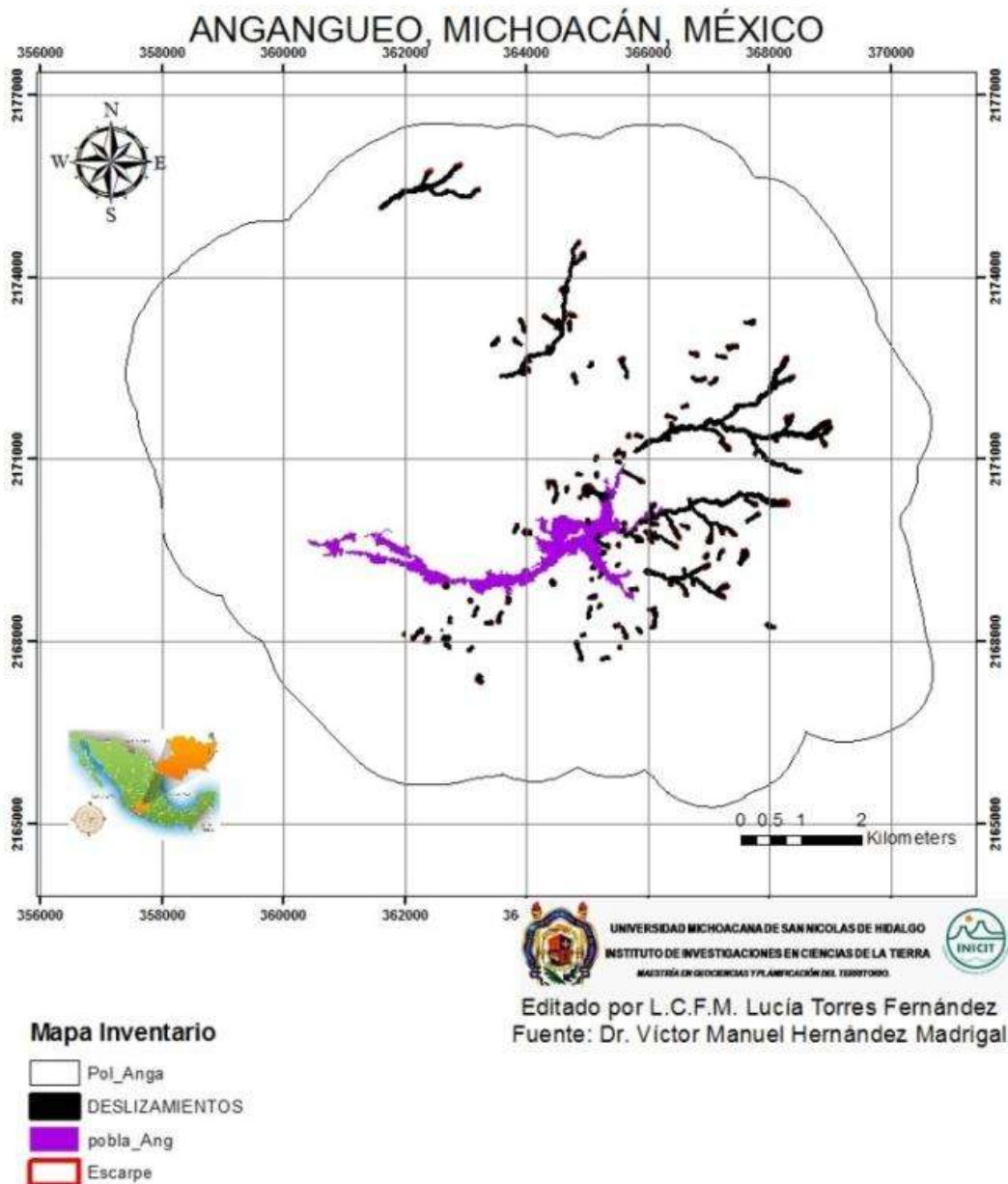


Fig. 5.3 (a) Mapa Inventario. Los polígonos de color negro muestran el escarpe y la zona de depósito de los deslizamientos. El polígono rosa muestra el poblado de Mineral de Angangueo.

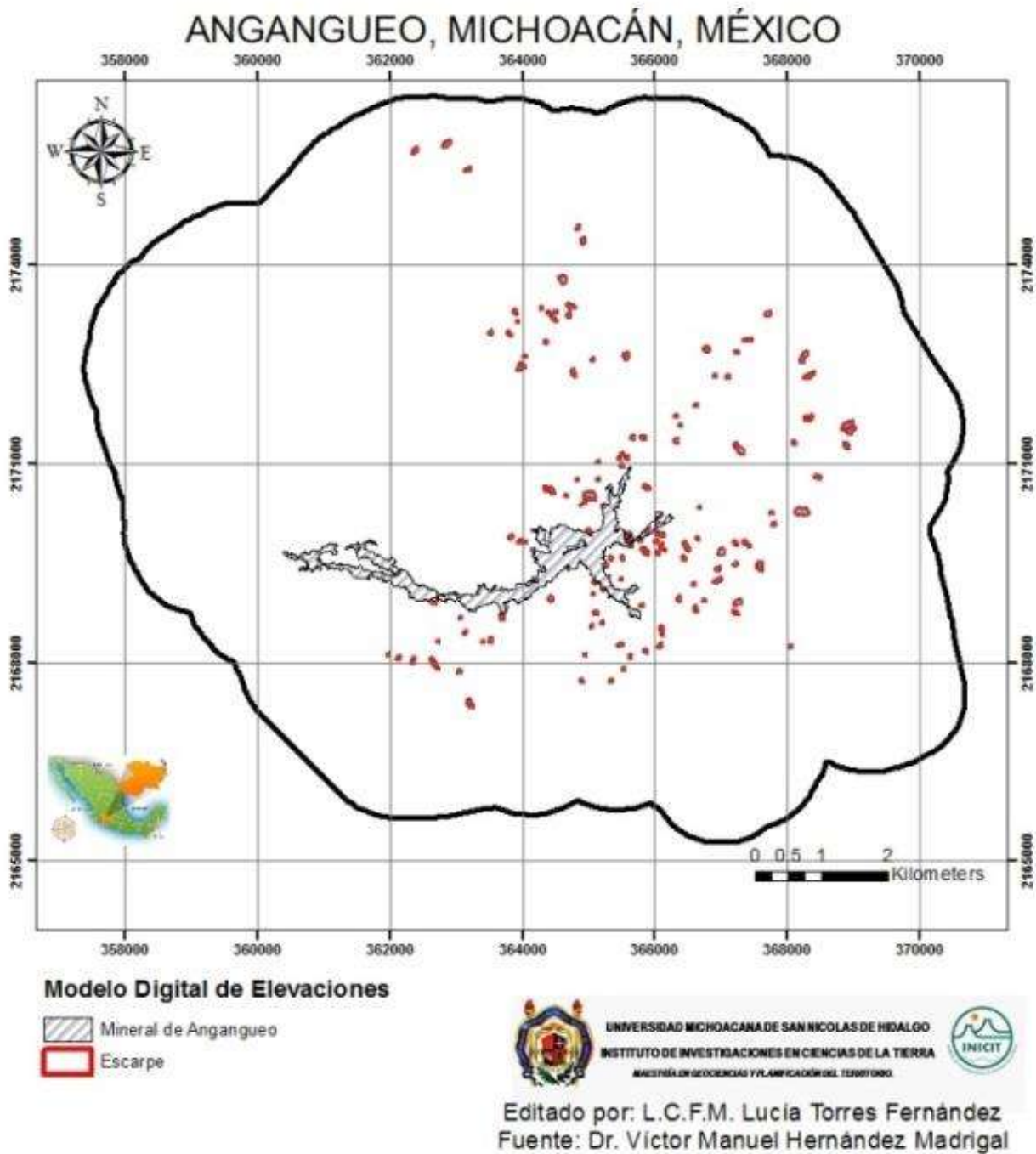


Fig. 5.3b Mapa Inventario. Los polígonos de color rojo muestran el escarpe de los deslizamientos. El polígono negro con gris muestra el poblado de Mineral de Angangueo.



### 5.2 Mapa Temático de Concavidad

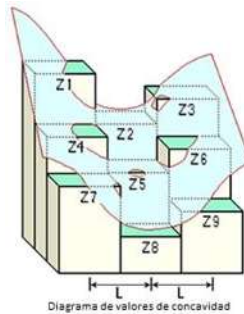
La concavidad se calcula en un sistema de información geográfica a partir de la segunda derivada de la superficie de entrada en una base celda por celda.

Para cada celda, se tiene un polinomio de orden 4:

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I$$

el cual tiene condiciones de una superficie compuesta de una ventana de 3x3. Los coeficientes  $a, b, c$ , se calculan a partir de esta superficie y así sucesivamente.

Las relaciones entre los coeficientes y los nueve valores de elevación para cada número de celda se muestran en el siguiente diagrama:



$$A = \frac{\left[ \left( \frac{Z1 + Z3 + Z7 + Z9}{4} \right) - \left( \frac{Z2 + Z4 + Z6 + Z8}{2} \right) + Z5 \right]}{L^4}$$

$$B = \frac{\left[ \frac{Z1 + Z3 - Z7 - Z9}{4} - \frac{Z2 - Z8}{2} \right]}{L^3}$$

$$C = \frac{\left[ \frac{-Z1 + Z3 - Z7 + Z9}{4} + \frac{Z4 - Z6}{2} \right]}{L^3}$$

$$D = \frac{\left[ \frac{Z4 + Z6}{2} - Z5 \right]}{L^2}$$

$$E = \frac{\left[ \frac{(Z2 + Z8)}{2} - Z5 \right]}{L^2}$$

$$F = \frac{-Z1 + Z3 + Z7 - Z9}{4L^2}$$

$$G = \frac{(-Z4 + Z6)}{2L}$$

$$H = \frac{(Z2 - Z8)}{2L}$$

$$I = Z5$$



El mapa de concavidad se obtiene a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), al aplicar dicha herramienta se genera el mapa temático de concavidad, el cual nos muestra la parte más cóncava de la ladera y viceversa la más convexa. Esto nos ayuda a identificar cual es la parte que tiene mayor acumulación de humedad.

### 5.3 Mapa Temático de Pendientes

Para cada celda, la pendiente representa el máximo cambio de valor de cada celda con sus vecinos. Básicamente, el cambio máximo en elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho vecinos identifica el descenso más pronunciado de la celda.

Conceptualmente, la herramienta se ajusta a los valores de un plano de z-valores de una celda de 3 x 3 alrededor de la celda de procesamiento de los vecinos o la celda central. El valor de la pendiente de este plano se calcula utilizando la técnica de máximo promedio. La dirección de la cara del plano es el aspecto del procesamiento de la celda. Cuanto menor sea el valor de la pendiente, el terreno es más plano; cuanto mayor sea el valor de la pendiente, más pronunciado es el terreno.

Si hay una ubicación de una celda con un valor z NoData, el valor z de la celda central será asignado a la ubicación. En el extremo del ráster, al menos tres celdas (fuera de alcance del ráster) contendrán "NoData" como valor de z. Estas celdas adoptan el valor z de la celda central. El resultado es un aplanamiento del plano 3 x 3 instalado en estas celdas del límite, que generalmente conduce a una reducción de la pendiente.

La pendiente ráster de salida se puede calcular con dos tipos de unidades, grados o porcentaje. El ascenso por ciento se puede entender mejor si se considera como el aumento dividido por la corrida, multiplicado por 100. Considere el triángulo B a continuación. Cuando el ángulo es de 45 grados, el incremento es igual a la carrera, y el ascenso por ciento es de 100 por ciento. A medida que el ángulo de la pendiente se acerca a la vertical (90 grados), como el triángulo C, el por ciento aumenta y comienza a acercarse al infinito.

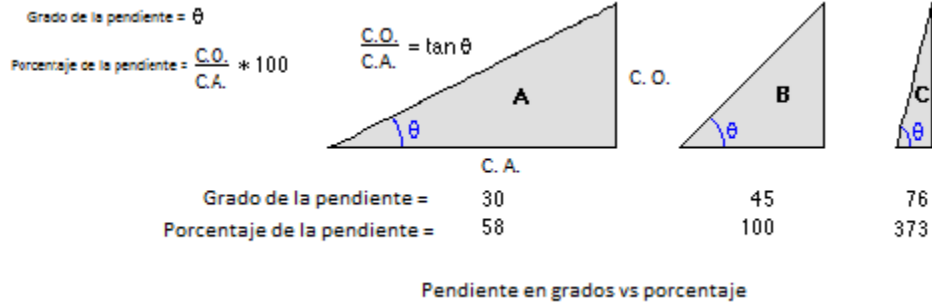


Fig. 5.4 Imagen del cálculo de la pendiente

La herramienta Pendiente se ejecuta con mayor frecuencia en un conjunto de datos de elevación, como los siguientes diagramas muestran. Las pendientes más pronunciadas están sombreadas de color rojo en el ráster de salida.

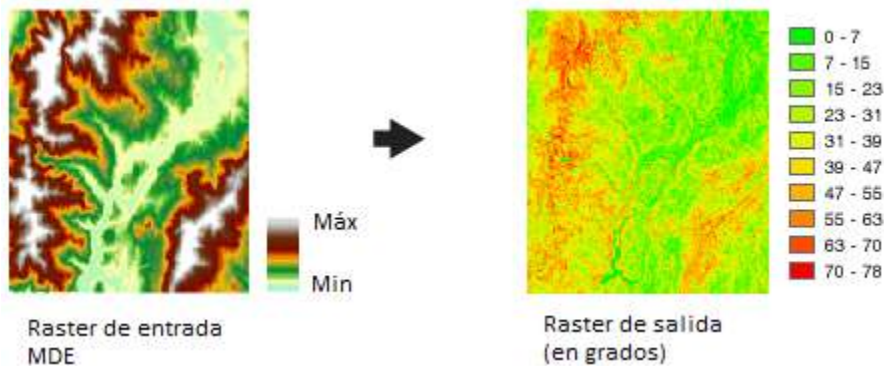


Fig. 5.5 Se muestra como se genera el mapa de pendientes

### El algoritmo de la pendiente

Los tipos de cambio (Delta) de la superficie en horizontales están dados por  $\left(\frac{dz}{dx}\right)$  y verticales  $\left(\frac{dz}{dy}\right)$  las direcciones de la celda central determinan la pendiente. El algoritmo básico que se utiliza para calcular la pendiente es:

$$pendiente\_radianes = ATAN \left( \sqrt{\left[\frac{dz}{dx}\right]^2 + \left[\frac{dz}{dy}\right]^2} \right)$$

La pendiente es comúnmente medida en grados, la cual usa el algoritmo:

$$pendiente\_grados = ATAN \left( \sqrt{\left[\frac{dz}{dx}\right]^2 + \left[\frac{dz}{dy}\right]^2} \right) * 57.29578$$



El valor 57.29578 muestra una versión truncada del resultado de la forma  $\frac{180}{\pi}$ .

El algoritmo de la pendiente puede ser interpretado como:

$$\text{pendiente\_grados} = \text{ATAN}(\text{resultante}) * 57.29578$$

Donde:

$$\text{resultante} = \sqrt{\left[\frac{dz}{dx}\right]^2 + \left[\frac{dz}{dy}\right]^2}$$

Los valores de la celda central y sus ocho vecinos determinan los deltas horizontales y verticales. Los vecinos se identifican con letras de la "a" a la "i", la letra "e" corresponde a la celda central con la cual empieza a ser calculado el aspecto de la ladera.

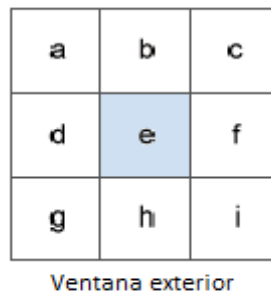


Fig. 5.6 Cálculo de la pendiente

La razón de cambio en la dirección x para la celda "e" se calcula con el siguiente algoritmo:

$$\left[\frac{dz}{dx}\right] = \frac{(c + 2f + i) - (a + 2d + g)}{8 * x_{\text{tamaño\_celda}}}$$

La razón de cambio en la dirección y para la celda "e" se calcula con el siguiente algoritmo:

$$\left[\frac{dz}{dy}\right] = \frac{(g + 2h + i) - (a + 2b + c)}{8 * y_{\text{tamaño\_celda}}}$$



Toda superficie inclinada natural (LADERA) está influenciada por la gravedad y puede ser modificada por procesos de remoción en masa.

Para la obtención del mapa de pendientes se hizo a partir del MDE al cual se le aplicó esta herramienta. El resultado fue un mapa de pendientes en el cual se muestra la inclinación de la ladera en la zona de estudio.

Después el mapa de pendientes se clasificó en 5 clases, lo cual se realizó de esta manera ya que se pudo observar que la mayoría de los deslizamientos se presentaron en las pendientes de  $\sim 30^\circ$  :

Grados	Clase
0° - 5°	1
5° - 10°	2
10° - 20°	3
20° - 45°	4
45° - 90°	5

#### 5.4 Mapa Temático de Insolación

Debido a que los cálculos de insolación pueden llevar mucho tiempo, es importante asegurarse de que todos los parámetros sean correctos. El cálculo de un modelo digital de elevación de gran tamaño (MDE) puede llevar horas, e incluso días. Los rásters de radiación de salida siempre serán de tipo punto flotante y tienen unidades de watts por metro cuadrado ( $Wh/m^2$ ). La salida directa del ráster será entero con unidad de horas.

La latitud para el área del sitio (unidades: grados decimales, positivo para el hemisferio norte y negativo para el hemisferio sur) se utiliza en los cálculos como declinación solar y la posición solar. Debido a que el análisis solar está diseñado para las escalas de paisaje y las escalas locales, es aceptable el uso de un valor de latitud para el MDE. Para las regiones geográficas más amplias, es necesario dividir el área de estudio en zonas con diferentes latitudes.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

Para las configuraciones de tiempo de varios días, el rango máximo de días es de un año (365 días o de 366 días para los años bisiestos). Si el día de inicio es mayor que el día final, los cálculos de tiempo se realizan al próximo año.

El uso del factor  $z$  es esencial para corregir los cálculos cuando las unidades de la superficie  $z$  se expresan en unidades diferentes para el plano  $x, y$ . Para obtener resultados precisos, las unidades  $z$  deberían ser las mismas que las unidades del plano  $x, y$ . Si no son las mismas unidades, utilice un factor  $z$  para convertir las unidades  $z$  en las unidades  $x, y$ . Por ejemplo, si sus unidades  $x, y$  son metros y las unidades  $z$  son pies, puede especificar un factor  $z$  de 0.3048 para convertir pies a metros. Se recomienda disponer de sus datos en un sistema de coordenadas de la proyección (unidades de metros).

El número de direcciones de cálculo necesarios se relaciona con la resolución del MDE de entrada. Terreno natural con una resolución de 15 metros por lo general es bastante suave por lo menos las direcciones son suficientes para la mayoría de los casos. Con MDE más finos, y en particular con las estructuras artificiales incorporadas en los MDE, el número de direcciones tiene que aumentar. Aumentar el número de direcciones será aumentar la precisión, pero también aumentará el tiempo de cálculo.

La cantidad de radiación solar que es recibida por la superficie es sólo una parte de lo que sería recibida fuera de la atmósfera. La transmisividad es una propiedad de la atmósfera y es la relación de la energía recibida en el borde superior de la atmósfera a la que llega a la superficie de la tierra por el camino más corto, promediado sobre todas las longitudes de onda. Los valores van desde 0 (sin transmisión) a 1 (transmisión completa). Valores observados normalmente son 0.6 o 0.7 para condiciones de cielo muy claro y un 0.5 para un cielo generalmente claro.

Debido a que los algoritmos corrigen los efectos de elevación, la transmisividad siempre se debe dar a nivel del mar.

El mapa de insolación muestra donde hubo menor radiación solar, por lo tanto donde hubo mayor acumulación de humedad. En el área de estudio nos muestra que donde hubo menor radiación solar es en las laderas que están orientadas al norte.



La clasificación del mapa de insolación (donde hubo mayor radiación solar del 3 al 6 de febrero de 2010) se realizó con base en los datos generados a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con una resolución de 15 m, el cual nos mostraba donde fueron las áreas donde hubo menor radiación solar por lo tanto hubo mayor acumulación de humedad.

### 5.5 Mapa Temático de Ríos y Carreteras

Los mapas temáticos de ríos y carreteras fueron cartografiados mediante líneas e imágenes de satélite a una escala 1:20000. Para poder trabajar con estos mapas, se les calculó un mapa de distancias y así poder manejar la información. Entonces tenemos que las herramientas de distancia euclidiana describen la relación de cada celda con un origen o un conjunto de orígenes basándose en la distancia de la línea recta.

Existen tres herramientas euclidianas:

- **Distancia euclidiana**, proporciona la distancia desde cada celda en el ráster hasta el origen más cercano.
- **Dirección euclidiana**, proporciona la dirección desde cada celda al origen más cercano.
- **Asignación euclidiana**, identifica las celdas que se asignarán a un origen basándose en la proximidad más cercana.

El origen identifica la ubicación de los objetos de interés, como pozos, centros comerciales, carreteras y masas forestales. Si el origen es un ráster, debe incluir solo los valores de las celdas de origen, y las otras celdas deben incluir NoData. Si el origen es una entidad, se transformará internamente en un ráster cuando ejecute la herramienta.

#### El algoritmo de distancia euclidiana

La distancia euclidiana se calcula desde el centro de la celda de origen hasta el centro de cada una de las celdas circundantes. La distancia euclidiana se calcula en cada una de las herramientas de distancia. Conceptualmente, el algoritmo euclidiano funciona del siguiente modo: para cada celda, la distancia a cada celda de origen se determina al calcular la hipotenusa con  $x_{\max}$  y  $y_{\max}$  como los otros dos lados del triángulo. Este cálculo deriva la verdadera distancia euclidiana, en vez de la distancia de la celda. Se determina la



distancia más corta a su origen, y si es menor que la distancia máxima especificada, el valor se asigna a la ubicación de la celda en el ráster de salida.

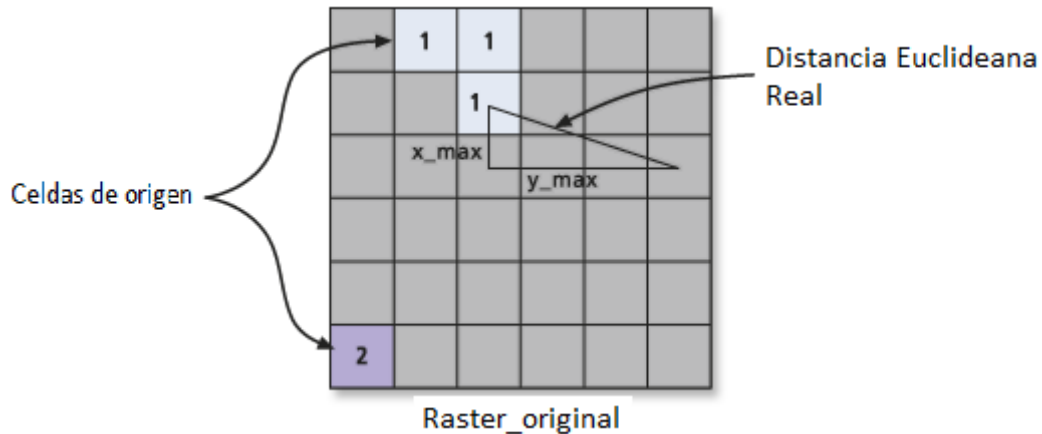


Fig. 5.7 Determinar la distancia euclidiana verdadera.

Los valores de salida para el ráster de distancia euclidiana son los valores de distancia de puntos flotantes. Si la celda está a la misma distancia de dos o más orígenes, la celda se asigna al origen que se encontró primero en el proceso de escaneo. No se puede controlar este proceso de escaneo.

La descripción anterior solo es una representación conceptual de cómo se derivan los valores. El algoritmo real calcula la información mediante un proceso secuencial de dos escaneos. La velocidad de la herramienta en este proceso es independiente del número de celdas de origen, la distribución de celdas de origen y la distancia máxima especificada. El único factor que influye en la velocidad con la que se ejecuta la herramienta es el tamaño del ráster. El tiempo de cómputo es linealmente proporcional al número de celdas en la ventana Análisis.

#### Limitaciones de la distancia euclidiana

Las herramientas de distancia euclidiana brindan información sobre la distancia euclidiana, o de línea recta. Es posible que no se pueda realizar un recorrido en una línea recta hasta una ubicación específica; tal vez deba evitar obstáculos como ríos o una pendiente empinada. En esos casos, debe considerar utilizar las herramientas de Coste de distancia para lograr resultados más realistas.



El cálculo del mapa de distancias se hizo a partir del mapa temático de carreteras el cual se cartografió en base a imágenes de satélite a una escala de 1:20000, de igual manera se realizó para el mapa temático de ríos. Después se hizo una reclasificación de distancias en base a las observaciones en campo y la infraestructura del municipio.

### **5.6 Mapa Temático de Uso de Suelo y Vegetación**

El mapa de uso de suelo y vegetación fue proporcionado por la COFOM, el cual fue cartografiado a una escala 1:20000 en el 2010, después de los PRM ocurridos en Angangueo Michoacán, cabe mencionar que dicha información fue editada y actualizada, ya que contaba con algunos polígonos que se encontraban con una clasificación diferente a la observada en campo. También se editó por la razón de que el área de estudio se extendió un kilómetro para poder abarcar los deslizamientos presentados en el municipio de Angangueo, Michoacán.

Un archivo shape es donde se encuentra cartografiada toda la información y la clasificación del tipo de suelo. Dicha información fue proporcionada por la Comisión Forestal del Estado de Michoacán (COFOM), los archivos que se encontraban cartografiados eran diferentes tipos de uso de suelo y vegetación, es por eso que se hizo la edición y actualización de dicho mapa.

### **5.7 Mapa de Litologías**

La litología es un factor determinante del paisaje, anteponiéndose al agente de modelado como factor predominante en el paisaje. En la investigación se llevó a cabo trabajo de campo en el cual se ha podido identificar las litologías predominantes en la zona de estudio, ya que ésta es una parte muy importante dentro de la geología, se pudieron localizar

- Depósitos aluviales-coluviales
- Depósitos coluviales.
- Suelos residuales
- Jales



## 5.8 Probabilidad condicional

En 1962 Matheron definió a la Geoestadística como "la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales". Dichos fenómenos los caracterizamos por la distribución espacial de una o más variables, que denominamos como variables regionalizadas.

La técnica utilizada en este trabajo fue la Geoestadística, la cual es una rama de la estadística aplicada que se especializa en el análisis, modelación y predicción de la variabilidad espacial de fenómenos en Ciencias de la Tierra. Dentro de ella tenemos la probabilidad condicional la cual nos ayudará a llegar al objetivo de nuestro trabajo. La probabilidad condicional es la probabilidad de que ocurra un evento  $A$ , sabiendo que sucede otro evento  $B$ . La probabilidad condicional se escribe  $P(A|B)$ , y se lee «la probabilidad de  $A$  dado  $B$ » (DeGroot, 1986).

Esta ecuación es parte importante del trabajo, ya que en base a esta se hacen los diferentes cálculos para cada mapa temático. Donde  $A$  representa el mapa inventario,  $B$  representa el área de cada clase de los factores condicionantes.

La probabilidad del evento  $A$ , bajo la suposición de que el evento  $B$  ha ocurrido, se denomina probabilidad condicional de  $A$ , dado  $B$ , y se denota

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

La notación utilizada para este trabajo es la que se denota a continuación, donde la probabilidad de la intersección entre la clase y el evento, será el área afectada sobre el área de la clase.

$$P(B|A_i) = \frac{P(B \cap A_i)}{P(A_i)} = \frac{\frac{n(B \cap A_i)}{n(A_t)}}{\frac{n(A_i)}{n(A_t)}} = \frac{n(B \cap A_i)}{n(A_i)}$$

Una de las principales aplicaciones de la Probabilidad Condicional es el Teorema de Bayes el cual se define de la siguiente manera:



### 5.9 Teorema de Bayes

Considera la suposición de que el espacio muestral está dividido en varios eventos simples  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  mutuamente excluyentes y su unión es todo el espacio muestral. Ahora sea otro evento  $B$ . Entonces el conjunto se puede formar con las intersecciones de los eventos simples  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ , esto lo podemos observar en la siguiente imagen:

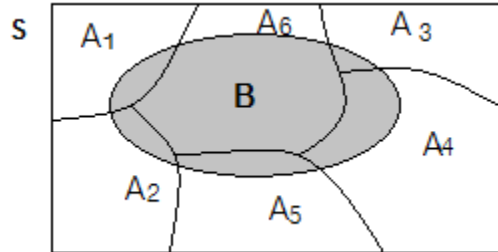


Fig. 5.8 Representación del Teorema de Bayes.

Supongamos que  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  es una partición del espacio muestral  $S$  y que  $B$  es cualquier evento. Entonces para cualquier evento  $A_i$

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{\sum_{k=1}^n P(B|A_k)P(A_k)}$$

Donde  $A_i$  serán los factores condicionantes y el evento  $B$  será el mapa inventario.

En otras palabras, los cálculos de las probabilidades a posteriori son:

$$P(B|A_i) = \frac{\frac{n(A_i)}{n(A_t)} * \frac{n(B \cap A_i)}{n(A_i)}}{\sum_1^i \frac{n(B \cap A_i)}{n(A_i)}} = \frac{P_p * P_c}{(\sum P_c)}$$

Donde  $P_p$  es la probabilidad a priori,  $p_c$  es la probabilidad condicional.

**5.- Validación de los resultados.** Esto se llevó a cabo con una salida de campo en la cual se verificaron los datos obtenidos tanto numéricamente como los que nos proporcionó el Sistema de Información Geográfica (SIG).

La integración de toda la información georeferenciada se realiza sobre un SIG (ArcGis 10). La identificación del grado de impacto o importancia de cada factor condicionante se realizará mediante análisis probabilístico condicional.

Este método trató de evaluar la relación probabilística entre los diversos factores relevantes para las condiciones de inestabilidad y las ocurrencias de deslizamientos.



Se basó en la superposición de mapas temáticos con el plano inventario de deslizamientos, para obtener una probabilidad condicionada de cada factor a la presencia o ausencia de deslizamientos, así como en la proyección en SIG de los diferentes mapas temáticos, para una mejor representatividad.

Para encontrar las probabilidades a posteriori se aplicó la siguiente metodología Bayesiana, la cual nos dice que la probabilidad condicional puede ser escrita como:

$$\begin{aligned} & Prob\{F_p[v_1(p), v_2(p), \dots, v_m(p)|F_p]\} \\ &= \frac{Prob\{F_p\}Prob\{F_p[v_1(p), v_2(p), v_3, \dots, v_m(p)|F_p]\}}{Prob\{F_p[v_1(p), v_2(p), v_3, \dots, v_m(p)|F_p]\}} \end{aligned}$$

Cuando asumimos que  $v_1(p), v_2(p), v_3, \dots, v_m(p)$  son condicionalmente independientes dada la condición  $F_p$  ( $p$  puede ser afectado por un futuro deslizamiento) entonces tenemos:

$$\begin{aligned} & Prob[v_1(p), v_2(p), v_3, \dots, v_m(p)|F_p] \\ &= Prob\{v_1(p)|F_p\}Prob\{v_2(p)|F_p\} \dots Prob\{v_m(p)|F_p\} \end{aligned}$$

Entonces, bajo la condición de independencia asumimos, el conjunto de probabilidad condicional nos da:

$$\begin{aligned} & Prob[v_1(p), v_2(p), \dots, v_m(p)|F_p] \\ &= \frac{Prob\{F_p\} Prob\{v_1(p)|F_p\}Prob\{v_2(p)|F_p\} \dots Prob\{v_m(p)|F_p\}}{Prob\{v_1(p), v_2(p), \dots, v_m(p)\}} \\ &= \frac{Prob\{v_1(p) v_2(p) \dots v_m(p)\}}{Prob\{v_1(p), v_2(p), \dots, v_m(p)\}} Prob\{F_p\} \\ &= \frac{prob\{F_p|v_1(p)\}}{prob\{F_p\}} \dots \frac{prob\{F_p|v_m(p)\}}{prob\{F_p\}} \end{aligned}$$

Donde tenemos que  $F_p$  denota que  $p$  será afectado por un deslizamiento futuro. En este trabajo se propone que cada pixel  $p$  se expresa como el conjunto de probabilidad condicional dado por:

$$Prob[F_p|v_1(p), v_2(p), \dots v_m(p)]$$

Esto nos dice que  $p$  será afectado por un deslizamiento futuro dado el valor del pixel  $m$ , ( $v_1(p), = c_1, \dots, v_m(p) = c_m$ ). El pixel  $p$ , el valor del pixel  $v_1(p)$  de la primera capa es  $c_1$



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

que es uno de las  $n_1$  clases. Así sucesivamente hasta tener las  $n$  clases de cada mapa temático.  $v_i(p)$  representa el valor de cada pixel en cada clase del mapa temático.

Bajo la independencia condicional asumimos que el conjunto de probabilidades condicionales pueden ser expresadas en términos de 3 componentes como se muestra en la ecuación anterior. El primer componente, la relación de  $prob\{F_p|v_1(p)\} \dots prob\{F_p|v_m(p)\}$  y  $Prob\{v_1(p), v_2(p), \dots, v_m(p)\}$ , consiste en las relaciones de probabilidades de los datos espaciales de entrada. El segundo componente, la probabilidad a priori  $Prob\{F_p\}$ , es la probabilidad de que el pixel  $p$  pueda ser afectado por un futuro deslizamiento a priori sin ninguna evidencia dada. El tercer componente consiste en  $m$  factores, y cada factor, es la relación de la probabilidad condicional  $prob\{F_p|v_k(p)\}$  y la probabilidad a priori  $prob\{F_p\}$ , indica una contribución del valor de cada pixel indicando el peligro de un futuro deslizamiento.



## CAPÍTULO 6. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Dentro de los resultados obtenidos para este trabajo, se mencionan a continuación, y se hace una descripción de cada uno de ellos.

### 6.1 Mapas Temáticos

Los mapas temáticos utilizados para dicho análisis y obtener resultados fueron:

➤ **Mapa de carreteras**

En la zona de estudio, se observaron algunos cortes de carretera que se ubican en algunas áreas en la que las rocas presentan un alto grado de alteración y en otros casos fracturamiento, no obstante, las pendientes de la mayoría de estos cortes se presentan en sus mayoría en ángulos altos.

➤ **Mapa de pendiente**

El mapa de pendientes (Fig. 6.8) revela que la zona montañosa presenta pendientes pronunciadas que van desde 29° a 48° en la vertiente oriental, mientras que en la vertiente occidental las pendientes varían desde 7° a 29° de inclinación. en la parte baja del municipio se presentan pendientes de 0 a 7° de inclinación.

➤ **Mapa de insolación**

Este mapa presenta la radiación solar ( $Kw/m^2$ ) recibida el 4 y 5 de Febrero del 2010 (Fig. 6.7). Se puede apreciar que en las laderas orientadas al norte hubo menor insolación, y se cree que es donde hubo mayor acumulación de humedad.

➤ **Mapa de ríos**

El drenaje presentado en el área de estudio y el análisis morfológico muestra una variedad de drenajes en el área de estudio (Fig. 6.1). Mineral ciudad de Angangueo que se localiza principalmente en la vertiente oeste de la sierra de angangueo lo cual está determinada por una red de tipo dendrítico pinnado en toda su totalidad. (Trujillo, 2014).

➤ **Mapa de concavidad**

En este mapa se puede apreciar la forma que tiene la ladera, es decir, los valores negativos me indican que tan cóncava es la ladera, y los valores positivos muestran que tan convexa es esta (Fig. 6.7), lo cual se pudo observar en campo.

➤ **Mapa de uso de suelo y vegetación**



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

Este mapa muestra el tipo de uso de suelo y vegetación que hay en el municipio (Fig. 6.5). La vegetación predominante son el bosque de Pino, Encino y Oyamel. Gran parte de las zonas urbanas se encuentran asentadas en estos bosques.

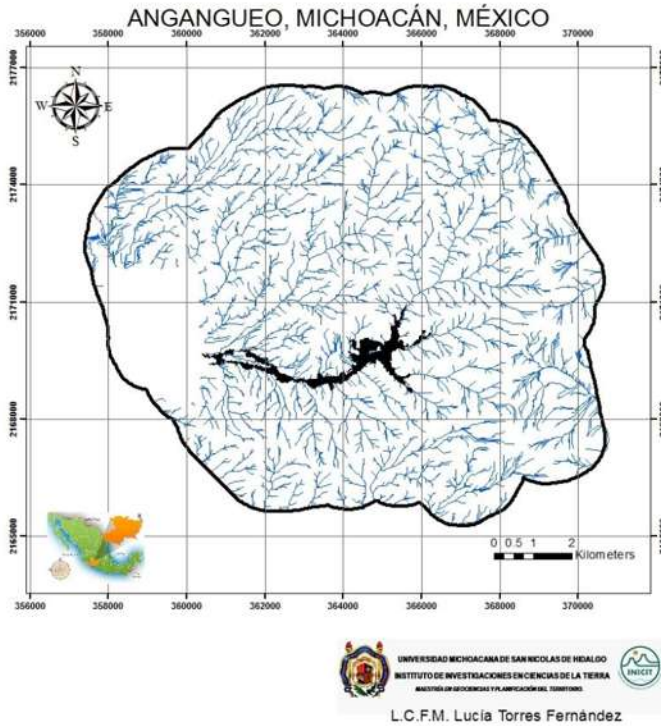
➤ **Litologías**

El suelo residual cubre la mayor parte del área de estudio, pero una parte importante son los depósitos aluviales-coluviales, en los cuales se encuentra asentada en gran parte la zonas urbanas (Fig. 6.9).

Dichos mapas se muestran a continuación, donde el polígono negro representa el poblado de Mineral de Angangueo.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO



Mapa de ríos

- pobla\_Ang
- Ríos

Fig. 6.1 Mapa de drenaje.

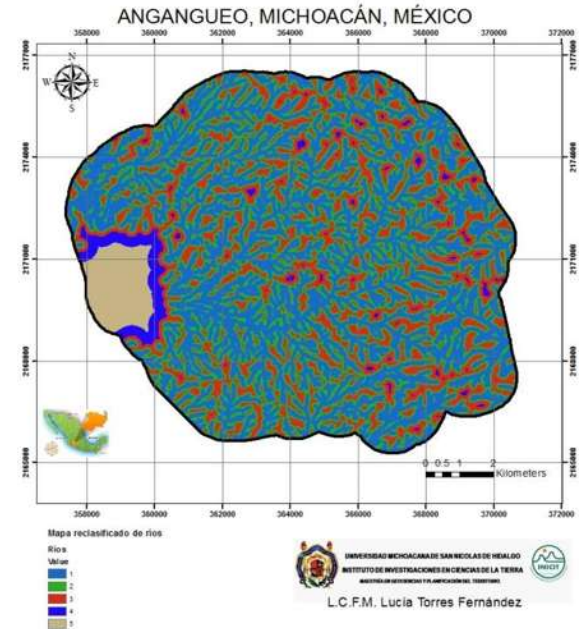
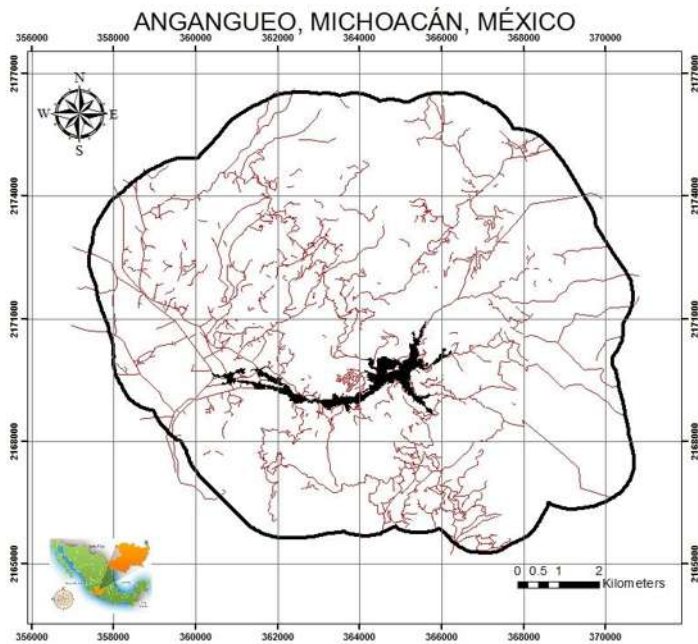


Fig. 6.2 Mapa de distancias al drenaje.

A partir de este mapa se generó el mapa de distancias correspondiente utilizando esta clasificación 0-50 m, 50 – 100 m, 100 – 200 m, 200 – 500, 500 – 1700 m.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

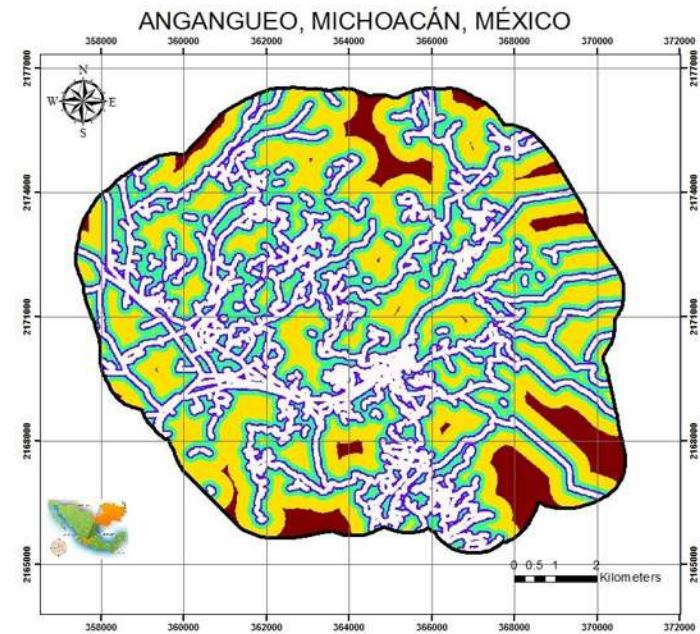


UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO  
L.C.F.M. Lucía Torres Fernández

Mapa de carreteras

■ pobla\_Ang  
— Carreteras

Fig. 6.3 Mapa de carreteras



Mapa reclasificado de carreteras

Carreteras  
Vías  
1  
2  
3  
4  
5

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO  
L.C.F.M. Lucía Torres Fernández

Fig. 6.4 Mapa de distancias a carreteras

A partir de este mapa se generó el mapa de distancias correspondiente utilizando esta clasificación 0-50 m, 50 – 100 m, 100 – 200 m, 200 – 500 m, 500 – 1100 m.

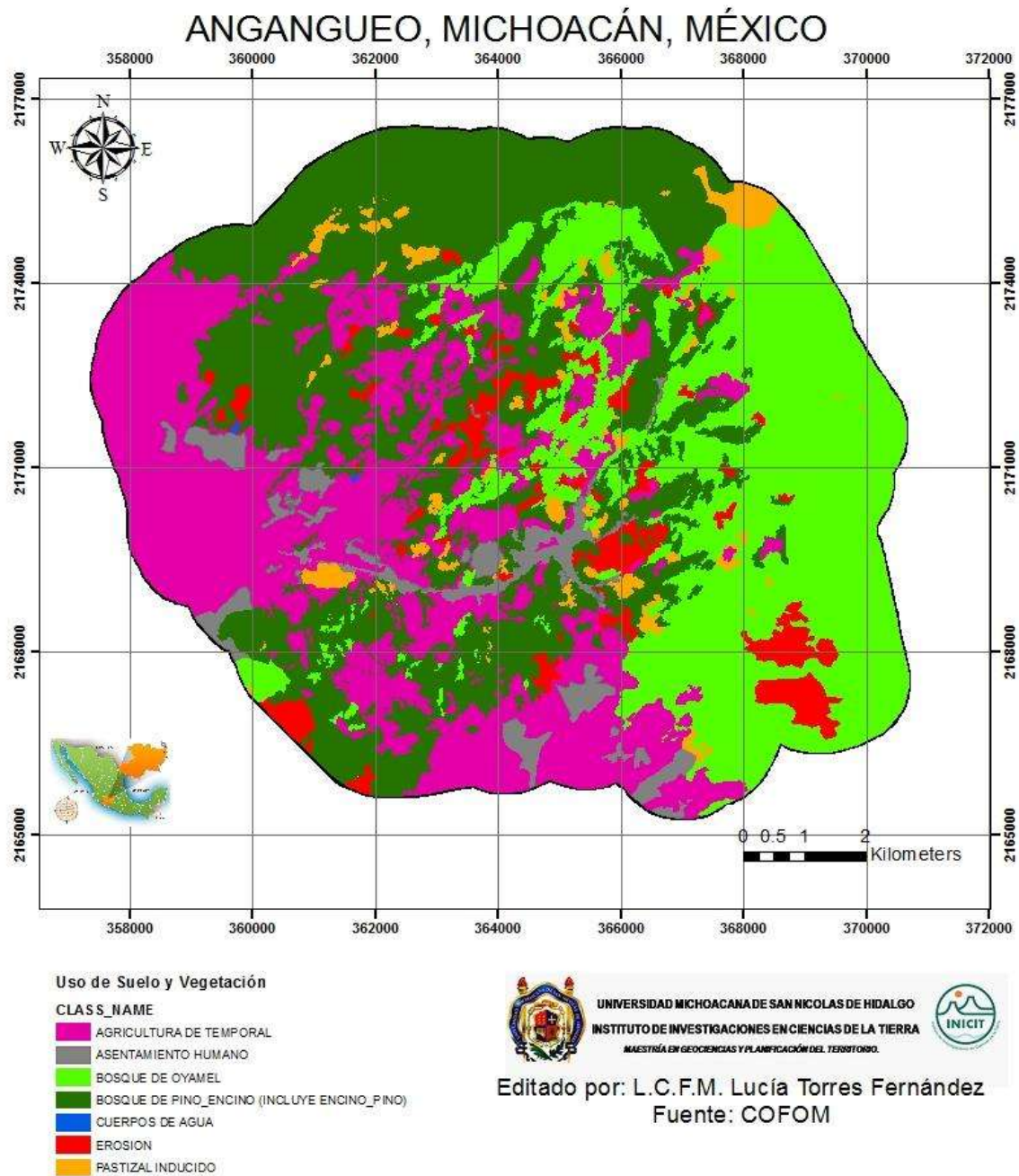
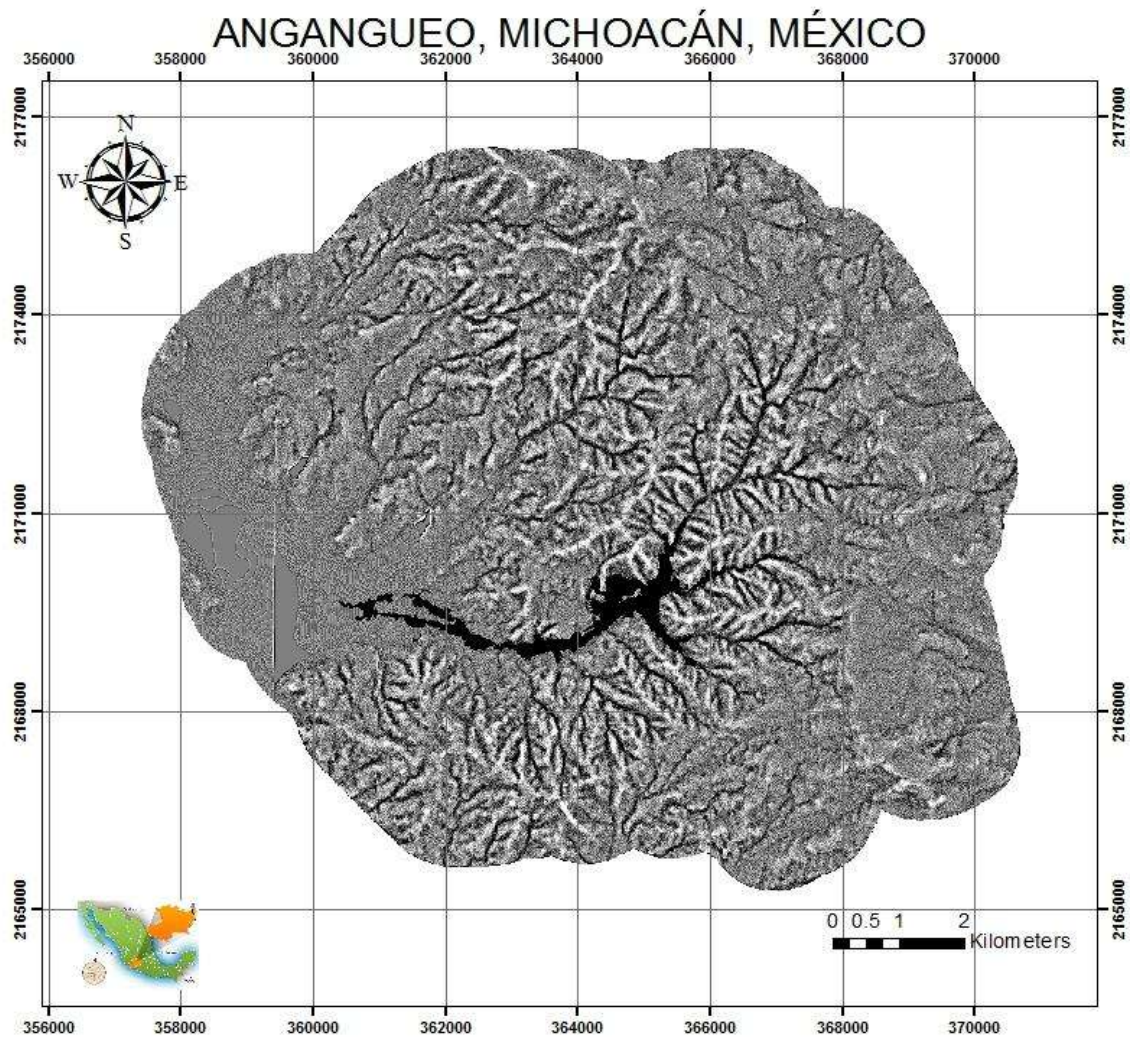




Fig. 6.5 Mapa de uso de suelo y vegetación




### Mapa de concavidad

 pobla\_Ang

### concavidad

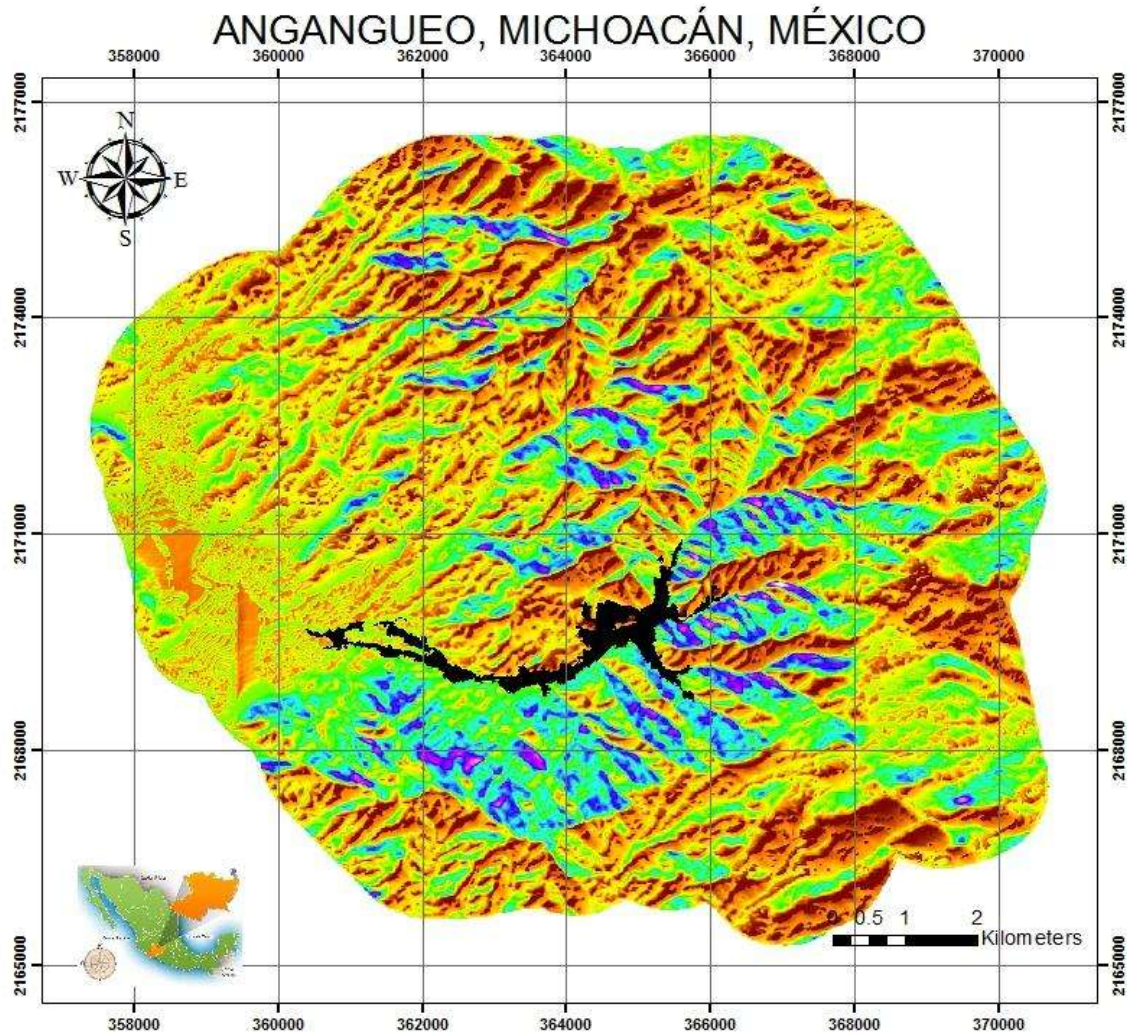
 High : 11.3459

 Low : -19.2007



L.C.F.M. Lucía Torres Fernández

Fig. 6.6 Mapa de concavidad es adimensional, los valores negativos nos indican que tan cóncava es la ladera, los valores positivos nos muestran la parte convexa.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO  
L.C.F.M. Lucía Torres Fernández

### Mapa de Insolación

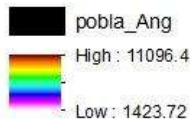
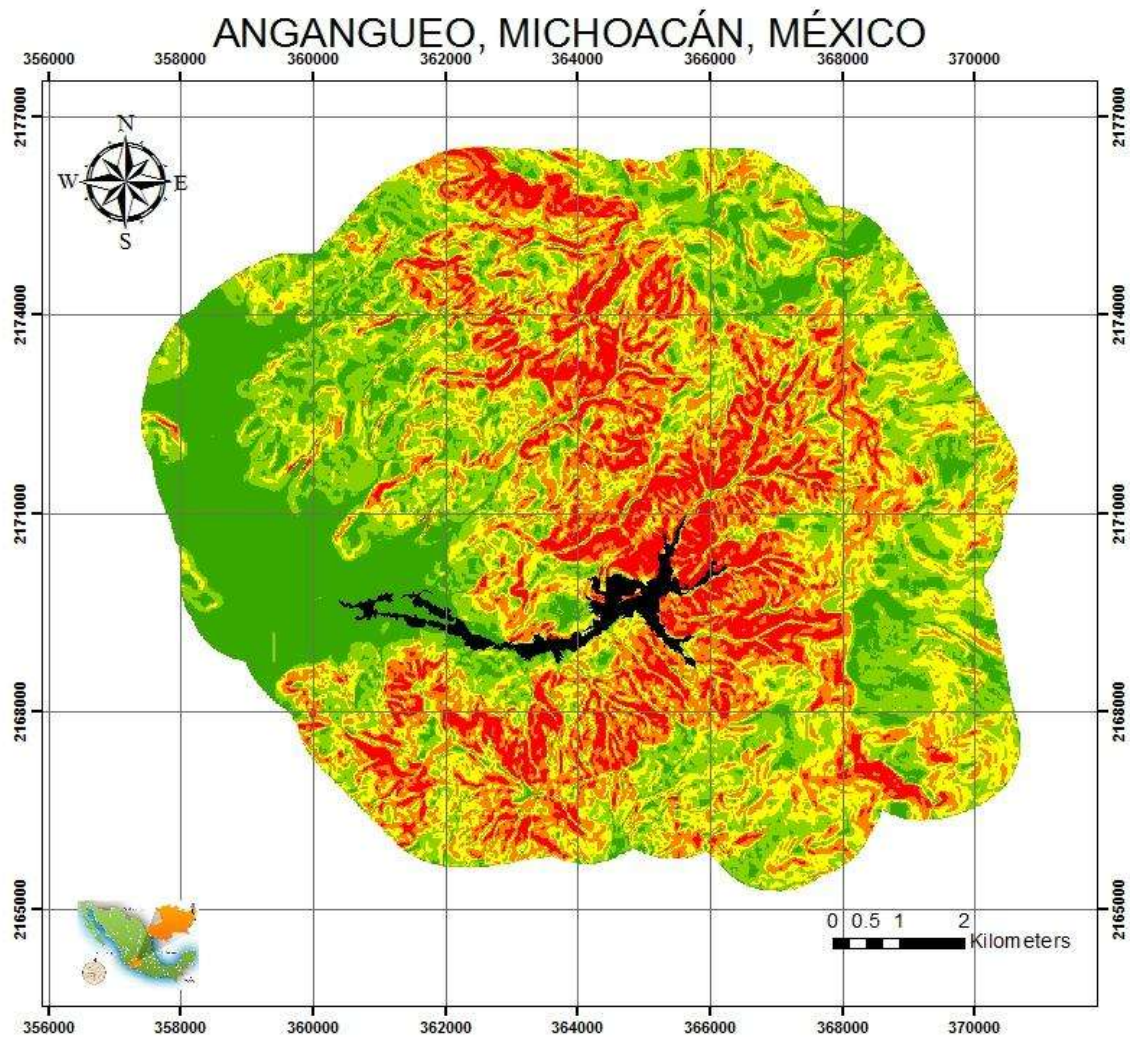








Fig. 6.7 Mapa de insolación unidades de watts por metro cuadrado ( $Wh/m^2$ ).

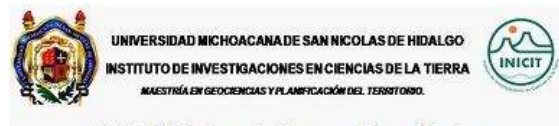


#### Mapa de pendientes

 pobla\_Ang

#### pendiente

-  0 - 7.047033123
-  7.047033124 - 14.47498696
-  14.47498697 - 21.90294079
-  21.9029408 - 29.90227568
-  29.90227569 - 48.56739044



L.C.F.M. Lucía Torres Fernández

Fig. 6.8 Mapa de pendientes en grados.

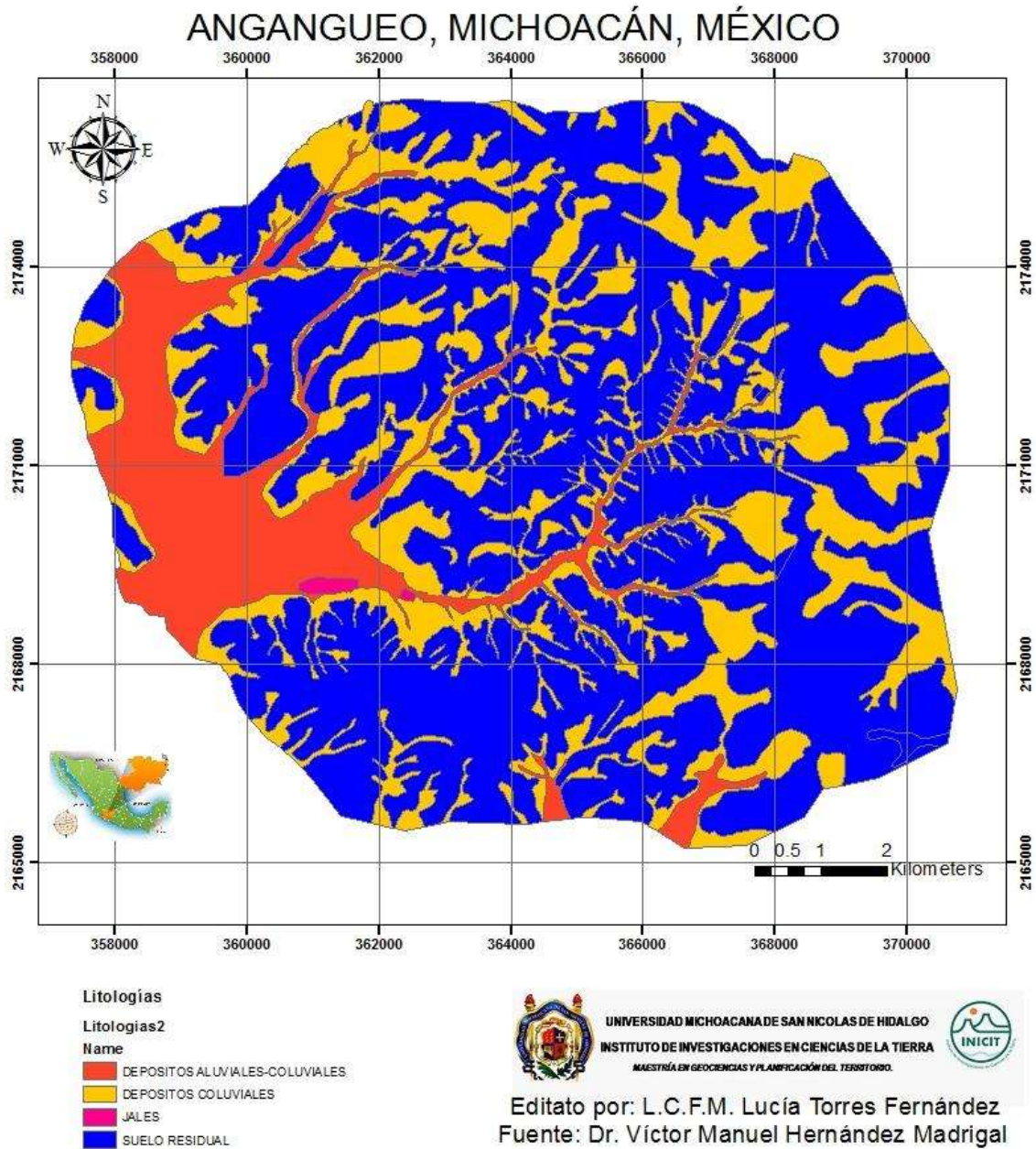


Fig. 6.9 Mapa de litologías.



La litología que se presenta sobre el poblado de Mineral de Angangueo, muestra una gran variedad de factores que en conjunto favorecieron a los deslizamientos producidos en el lugar. Se presentan suelos pocos profundos y algunos macizos rocosos con un alto grado de alteración hidrotermal y/o meteorización.

La zona de estudio está constituida principalmente por rocas ígneas extrusivas (andesitas) que cubren en su mayoría la sierra de Angangueo. Gran parte de las zonas estudiadas sobre los afloramientos de esta roca, presentan altos grados de alteración y en algunas de sus áreas se exhiben texturas y estructuras variables que muestran pequeñas vesículas indicando rocas de composición andesítico-basáltico.

Sobre la parte occidental de la zona presenta una unidad brechoide con matriz andesítica, posterior a las andesitas de la sierra de Angangueo que cubren discordantemente a los derrames de esta y se encuentran en contacto con depósitos de aluviones no consolidados y originados por rocas preexistentes, transportados y posteriormente depositados en las partes bajas. Por el contrario, sobre la parte este se encuentra una unidad de flujos piroclásticos de tipo ignimbrítico posterior a las brechas andesíticas. La unidad andesítica anteriormente mencionada se encuentra en contacto con depósitos de flujos piroclásticos de caída y depósitos aluviales que según Corona (2000), estos últimos dos depósitos son considerados los más recientes. (Trujillo, 2014).

### **6.1.1 Andesitas**

En sucesión a lo anterior se encuentra una unidad de andesitas del mioceno tardío. Esta unidad representa la manifestación masiva con que se inicia la actividad volcánica de la FVTM en la zona (Pasquaré., et al 1991). Constituye las sierras de Chincua, Rancho Grande y Campanario, que conjuntamente forma una estructura alargada de dirección NNW-SSE más conocida como sierra de Angangueo. Cubre en discordancia angular a la secuencia metamórfica. En las posiciones centro, norte y suroeste, la andesita está cubierta por las coladas basálticas de los edificios volcánicos cuaternarios (Corona, et al 2000).

En los recorridos en campo en el NE-SO del área de estudio se pudieron localizar andesitas y dacitas que van de color rosa, naranja a verde, esta roca se encuentra en gran parte del municipio. Dichas rocas se observaron que tienen un alto grado de intemperismo, lo cual es favorable a que ocurran deslizamientos, ya que sobre esta roca se encuentran depósitos aluviales-coluviales y suelo residual, y todo este material es propenso a desprenderse de la ladera si se presentan las



condiciones para que esto ocurra. Las andesitas, son la unidad litológica más antigua, las ignimbritas se emplazaron sobre esta unidad.



Fig. 6.10 Andesita.

### 6.1.2 Ignimbritas

Las ignimbritas encontradas en el NE-SO del municipio de Angangueo, tienen un alto contenido de pómez, son de color café a naranja, la roca se encuentra intemperizada y es muy deleznable.

Esta sucesión de depósitos de flujos piroclásticos de tipo ignimbríticos y esporádicamente depósitos de caída piroclástica cuyo origen es la caldera “el capulín” y se tiene una edad del plioceno. Cabe resaltar que este tipo de roca solo aflora en la parte norte y al oeste de la zona de estudio. (Trujillo, 2014).

El contacto de la ignimbrita y la andesita se localiza en las coordenadas UTM (361505, 2174491) y (364060, 2169658). En la cual se encontró una secuencia de andesita-dacita-flujo piroclástico.

En el recorrido de campo, en la zona de reubicación de las personas damnificadas, se observó que las casas se encuentran asentadas en ignimbritas, la cual soporta depósito coluvial. Un dato importante es que se observó gran cantidad de humedad, lo cual puede deberse al cambio de permeabilidad.



Fig. 6.11 Ignimbrita localizada en el municipio de Angangueo, Michoacán.



Fig. 6.12 Primer contacto localizado entre la ignimbrita y andesita en el municipio de Angangueo, Michoacán, localizado en UTM (361505, 2174491), se muestra la secuencia, flujo piroclástico – dacita - andesita.

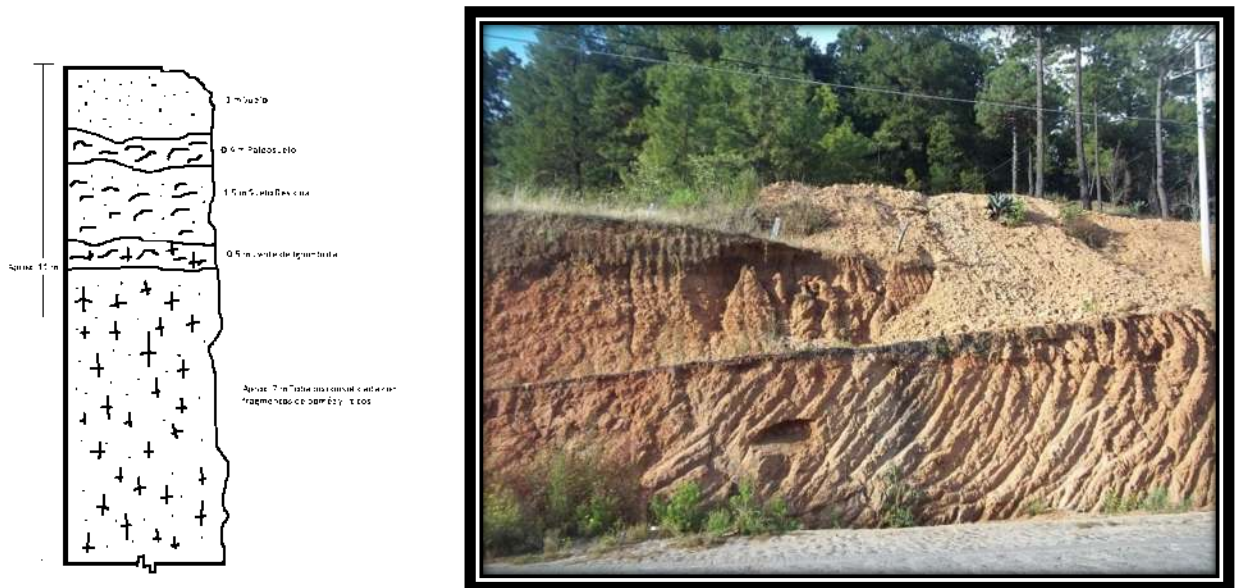


Fig. 6.13 Segundo contacto localizado entre la ignimbrita y andesita en el municipio de Angangueo, Michoacán, localizado en UTM (364060, 2169658), tiene aproximadamente 11 metros de altura.

### 6.1.3 Depósitos aluviales-coluviales

Los aspectos más importantes a considerar son el tipo de depósito y el material que lo compone, su densidad, plasticidad, humedad, permeabilidad; la litología de las rocas, su estructura, alteración y meteorización. Por ejemplo el tipo de depósito condiciona ciertas características en su comportamiento; los depósitos volcanoclásticos, glaciales, escombros de piemonte, aluviales, coluviales, y de antiguos flujos de detritos son susceptibles a ser movilizados y/o removilizados, ya que son materiales permeables, donde el agua se infiltra fácilmente, superando su capacidad de infiltración y produciendo la saturación rápida y facilitando el escurrimiento rápido del agua en este material saturado (Hauser, 1997).

Los depósitos aluviales- coluviales son los materiales sin consolidar, originados por la erosión de rocas preexistentes. Se encuentran en las partes topográficas más bajas y están compuestos por limos, arcillas, arenas, gravas sin consolidar y cubren discordante e indistintamente a todas las unidades descritas anteriormente. (Trujillo, 2014).

Su disposición es alargada, pero no siempre a favor de las estructuras. Sus depósitos son una mezcla de aluvial con aportes procedentes de las laderas por lo que una definición precisa de los



mismos, se hace difícil. En el área de estudio, la zona urbana se encuentra asentada en depósitos aluviales-coluviales.



Fig. 6.14 Depósitos aluviales – coluviales

#### 6.1.4 Suelos residuales

El suelo es uno de los recursos naturales de gran importancia y utilidad para el hombre, sin embargo, debido al manejo y el cambio de uso de suelo que hace el humano, éste se deteriora y sus propiedades físicas y químicas cambian. (Cortes, 2013).

Al Oriente del estado de Michoacán, existen suelos de origen volcánico reportados por el INEGI (1982) como Andosoles que por su naturaleza, ubicación topográfica (laderas con pendientes muy pronunciadas) y cambio de uso de suelo, son susceptibles de perderse de manera paulatina o drástica por deslizamientos ante eventos detonantes. Estos suelos cuando se les desprotege de su cobertura vegetal son muy propensos a perder su estructura y están sujetos a efectos de erosión acelerada.

En este trabajo se habla de suelos residuales, ya que estos son de manera general, sin utilizar una clasificación. Estos suelos son el producto de la lixiviación de las rocas subyacentes y de los minerales sulfurosos, especialmente el sulfuro de hierro. Si bien es cierto que el hierro se disuelve rápidamente en aguas sulfatadas, se precipita como hidróxido de hierro en presencia de oxígeno, y



la zona superficial y el afloramiento de un cuerpo de sulfuros se mancha generalmente con coloraciones rojizas debido al contenido de óxidos de hierro principalmente aluminio.

El suelo residual se encuentra en gran parte del municipio de Angangueo, con espesores que van desde los 30 cm hasta 2 m aproximadamente. Lo cual hace que el lugar de estudio sea más propenso a ocurra un desprendimiento de material, ya que este tipo de suelos tiene una alta permeabilidad y esto favorece a que haya mayor infiltración.



Fig. 6.15 Suelo residual

## 6.2 Probabilidad a Priori

La probabilidad a priori nos muestra la clase que tiene mayor recurrencia. La cual se calcula de la siguiente manera:

$$P_p = \frac{\text{Area de la clase}}{\text{area total}} = \frac{A_i}{A_t}$$

A continuación se muestra una comparación de los cálculos realizados a los diferentes factores condicionantes, en los mapas se muestra la probabilidad a priori y la reclasificación de cada uno de ellos para a partir de ella poder realizar los cálculos necesarios para cada uno.

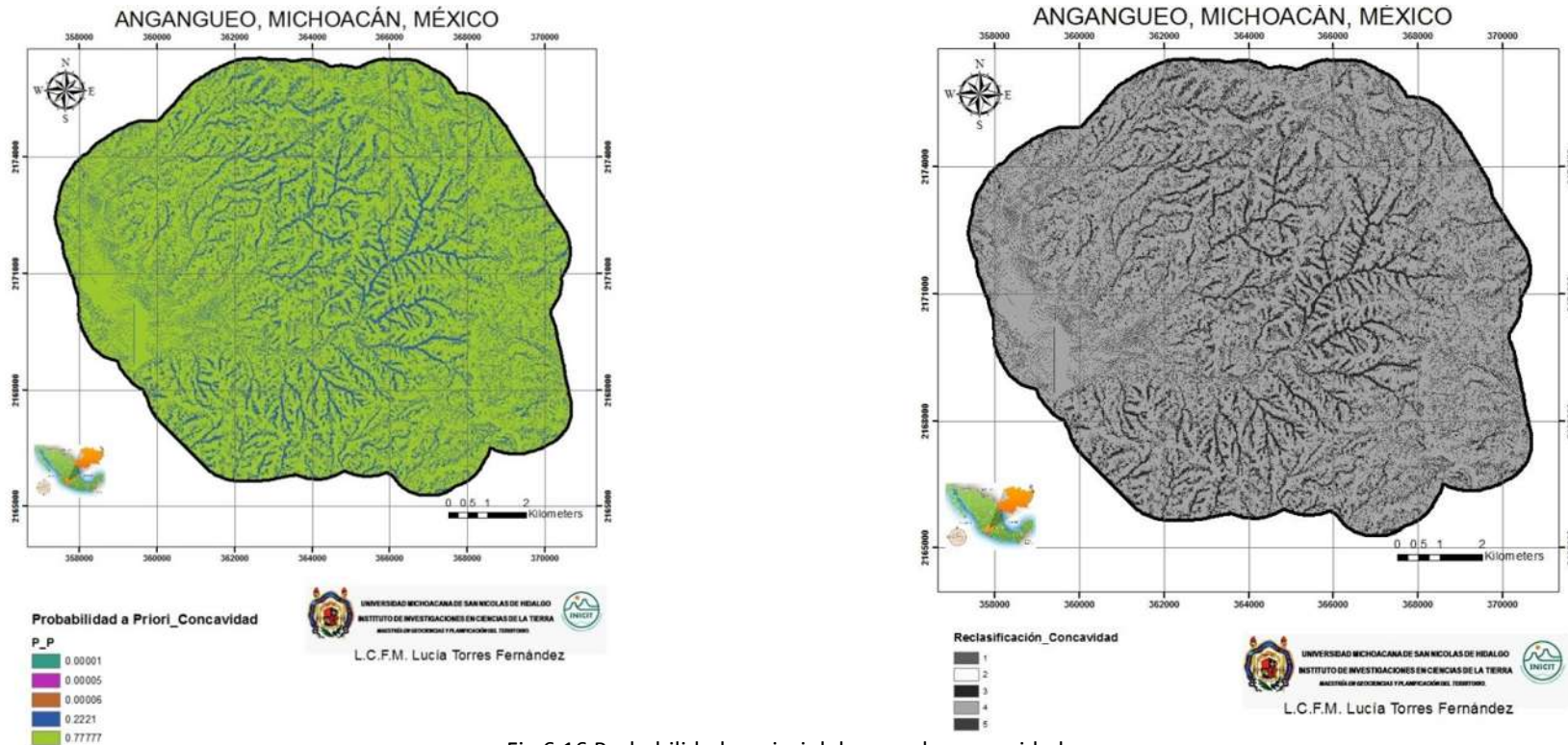


Fig.6.16 Probabilidad a priori del mapa de concavidad

Clasificación de la Concavidad	Clase	Área de la clase	$P_p$
-19.20068 - -13.09138	1	1145.79275	0.00001
-13.09138 - -6.98206	2	7250.66557	0.00006
-6.98206 - -0.87274	3	22898973.3	0.2221
-0.87274 - 5.23658	4	93483305.7	0.77777
5.23658 - 11.345857	5	5656.98942	0.00005

Tabla 1. Probabilidad a priori de la concavidad.  $*p_p = \text{probabilidad a priori}$



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

En la figura 6.16 se muestra el mapa de concavidad reclasificado en 5 clases, las cuales se tomaron en intervalos iguales, esto debido a que en este caso, nos referimos a dividir la concavidad de la ladera en 5 intervalos iguales. Se calcularon las áreas de cada una de las clases, para después poder calcular la probabilidad a priori. En la tabla 1 se puede observar que efectivamente la clase 4 es la que más recurrencia tiene.

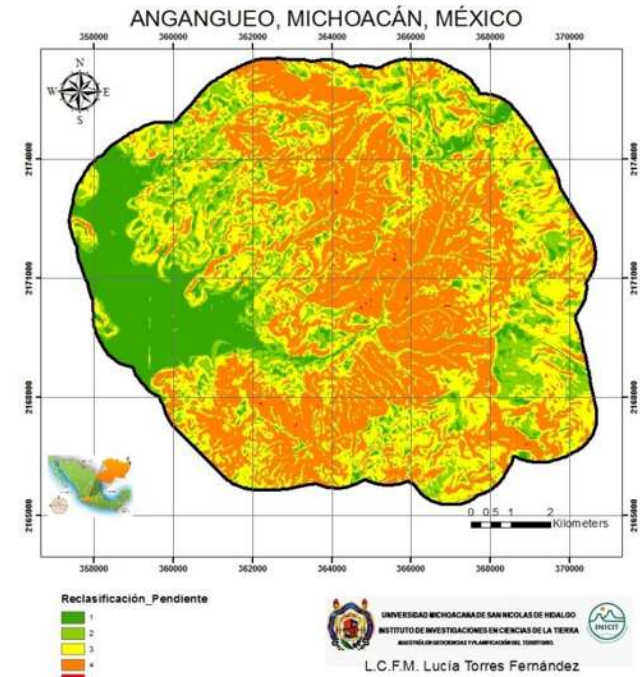
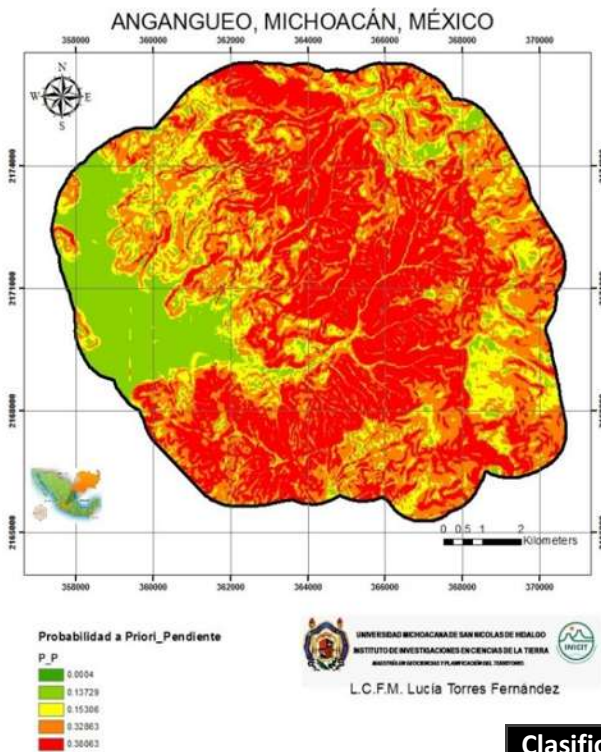


Fig. 6.17 Probabilidad a priori del mapa de pendientes

Clasificación de la Pendiente	Clase	Área de la clase	$P_p$
0-5	1	15885014.93242	0.13729
5-10	2	17664132.34098	0.15306
10-20	3	38414289.20408	0.32063
20-45	4	44395299.16456	0.38063
45-90	5	41241.25242	0.0004

Tabla 2. Probabilidad a priori de la pendiente.  $*p_p = \text{probabilidad a priori}$



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

En la figura 6.17 se muestra el mapa de pendiente reclasificado en 5 clases, las cuales se tomaron en esos rangos, la razón de esta clasificación fue, en base a los caminamientos en campo, en los cuales se observaron que donde se presentaron la mayoría de los deslizamientos fue en pendientes de  $\sim 30^\circ$ .

Con esta clasificación se pueden hacer los cálculos de la mejor manera posible, tal que se represente numéricamente la pendiente de mayor recurrencia y analizarlas. Después se calcularon las áreas de cada una de las clases, y así poder obtener la probabilidad a priori.

En la tabla 2 se puede observar que efectivamente la clase 4 es la que más recurrencia tiene.

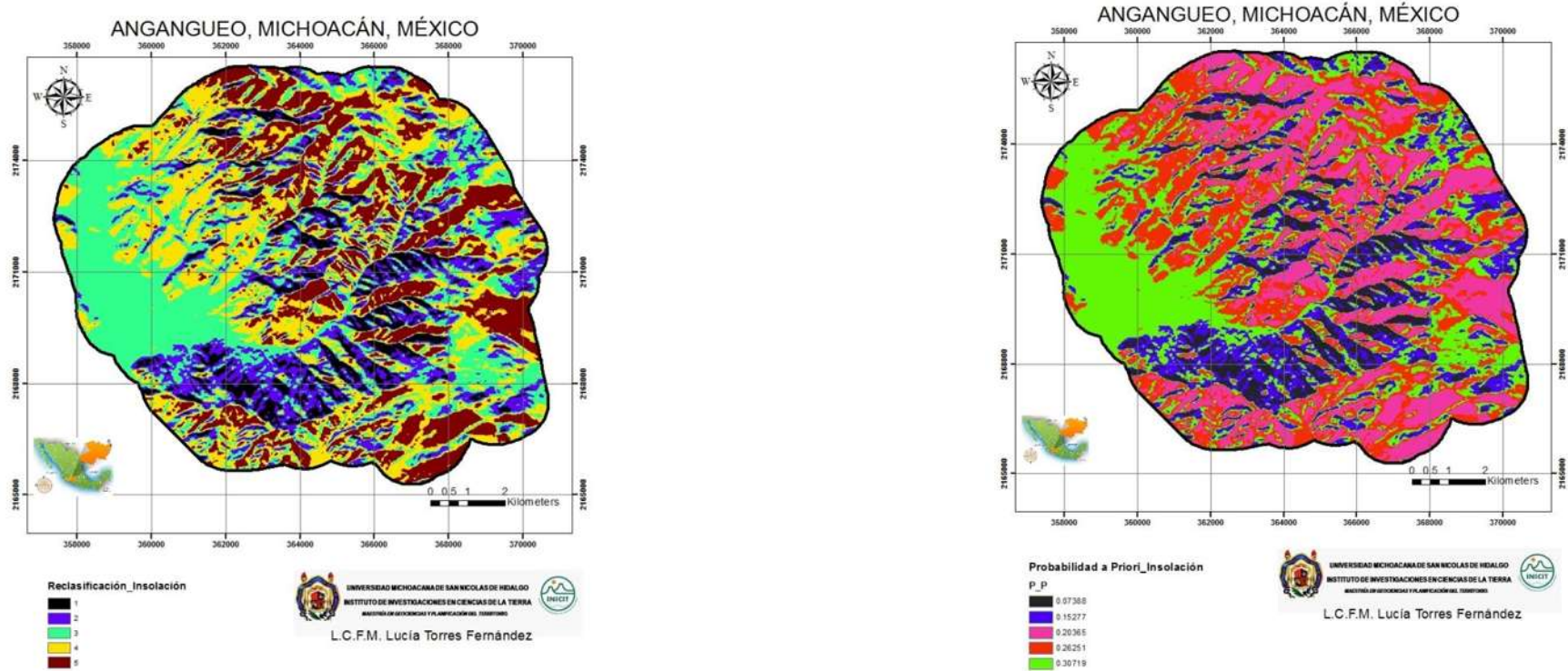


Fig. 6.18 Probabilidad a priori del mapa de insolación.

Clasificación de la Insolación	Clase	Área de la clase	$P_p$
1423.723511 - 5164.338087	1	8541960.29726	0.07388
5164.338087 - 6675.697511	2	17813179.62918	0.15277
6675.697511 - 7809.21708	3	35757569.60721	0.30719
7809.21708 - 8867.168677	4	30615286.20992	0.26251
8867.168677 - 11096.423828	5	23664305.83387	0.20365

Tabla 3. Probabilidad a priori de la insolación. \* $p_p$  = probabilidad a priori



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

En la tabla 3 se muestra la probabilidad a priori de cada una de las clases en el mapa temático de insolación, dichas clases se tomaron en intervalos iguales. En la Fig. 6.18 se puede observar el mapa reclasificado y el mapa en el cual se representa la probabilidad a priori, en lo cual se puede constatar que la clase 3 es la que tiene mayor probabilidad a priori.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
 MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

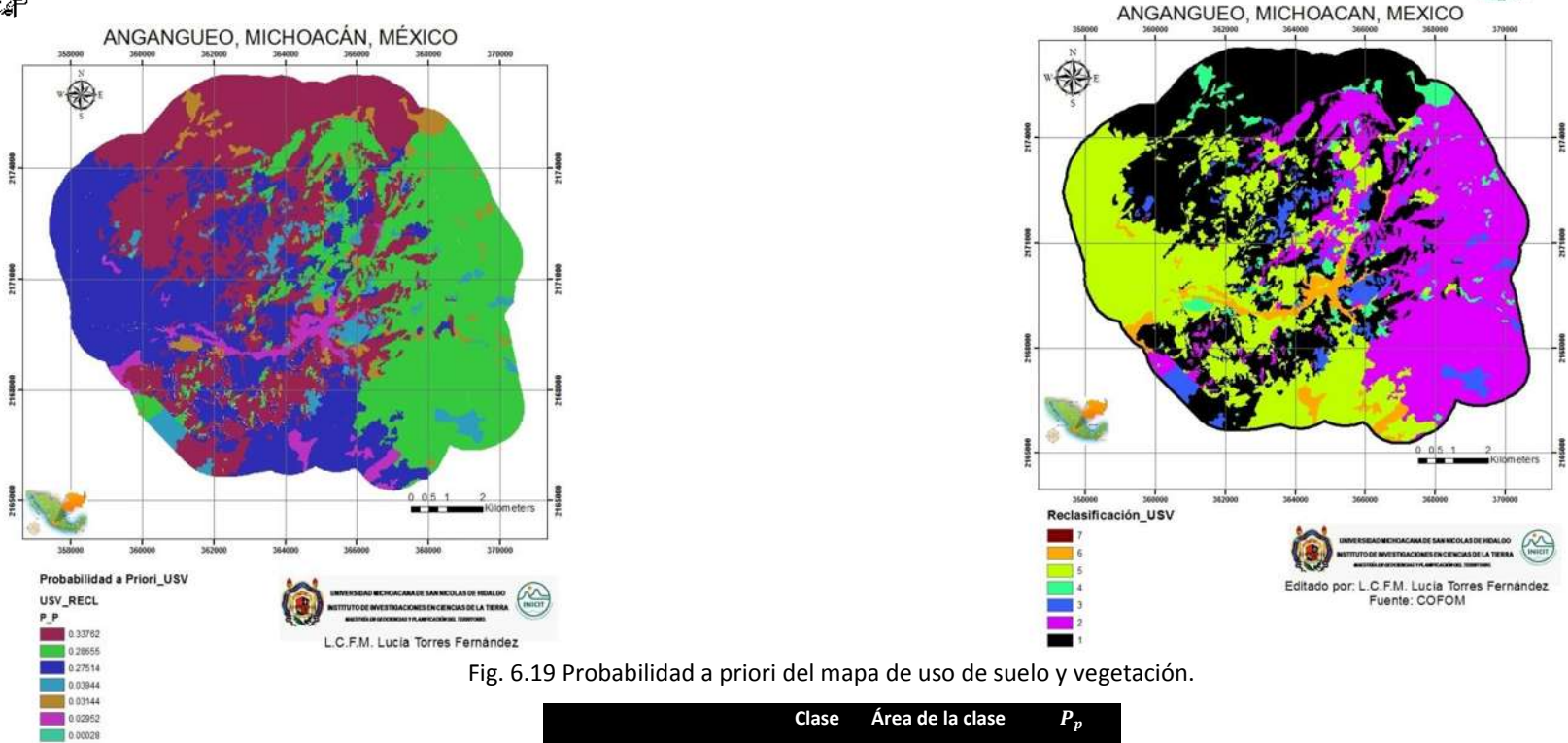


Fig. 6.19 Probabilidad a priori del mapa de uso de suelo y vegetación.

Clasificación de USV	Clase	Área de la clase	P <sub>p</sub>
Bosque de Pino_Encino	1	40014186.1	0.33762
Bosque de Oyamel	2	34119934	0.28665
Erosión	3	5457326.01011	0.03944
Pastizal Inducido	4	3798468.82859	0.03144
Cuerpo de Agua	5	33845.42335	0.00028
Asentamiento Humano	7	4898142.46154	0.02952
Agricultura de Temporal	8	32085913.11371	0.27514

Tabla 4. Probabilidad a priori del uso de suelo y segetación (USV). \*p<sub>p</sub> = probabilidad a priori



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

En el mapa de USV solo se le asignó un identificador para cada tipo de uso de suelo y vegetación, en base a esas clases se procedió a calcular la probabilidad a priori, la cual nos muestra en la tabla 4 que el Bosque de Pino\_Encino, el Bosque de Oyamel y la agricultura de temporal son las clases que tienen mayor recurrencia, en otras palabras esto quiere decir que son el tipo de suelo y vegetación que predominan en la zona de estudio.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
 MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

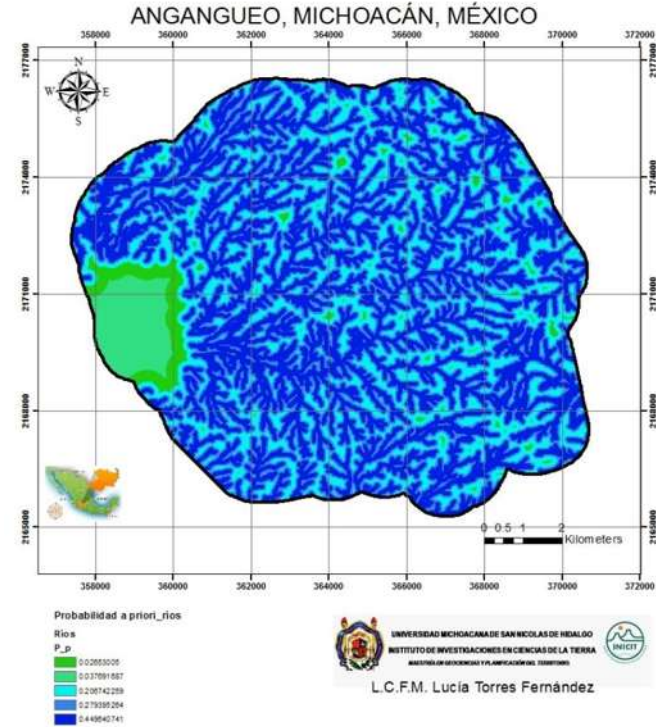
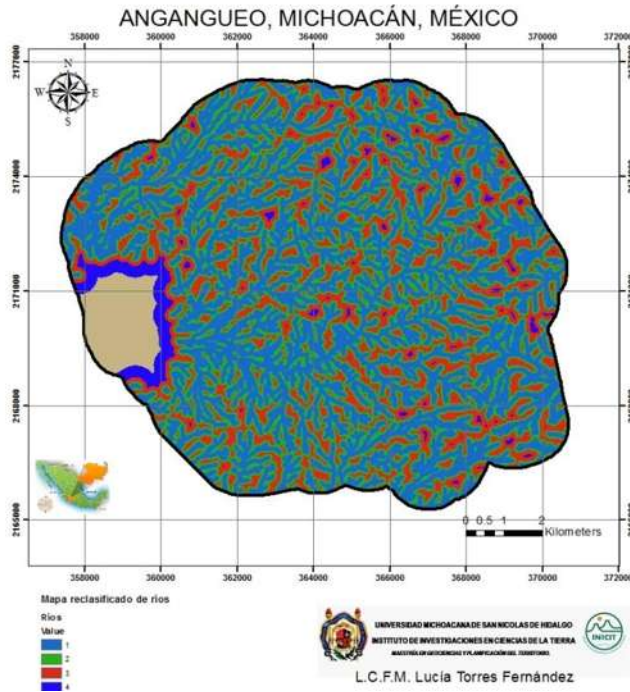


Fig. 6.20 Probabilidad a priori del mapa de distancias de ríos.

Clasificación de los Ríos	Clase	Área de la clase	$P_p$
0 – 50	1	52200335.71	0.4485
50 – 100	2	32550593.67	0.2797
100 – 200	3	24178474.79	0.2077
200 – 500	4	3076331.261	0.0264
500 - 1700	5	4386179.97	0.0377

Tabla 5. Probabilidad a priori de ríos.  $*p_p = \text{probabilidad a priori}$



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

En la tabla 5 se muestra la probabilidad a priori de cada una de las clases en las que se reclasificó el mapa de distancias de ríos. Esta reclasificación se realizó de esa manera, ya que en campo se observó que los ríos se encontraban más o menos a esa distancia de las laderas. Aunque como se puede observar con los resultados, las clases importantes son de 1 – 3, como se puede observar es donde hay mayor recurrencia de estas.

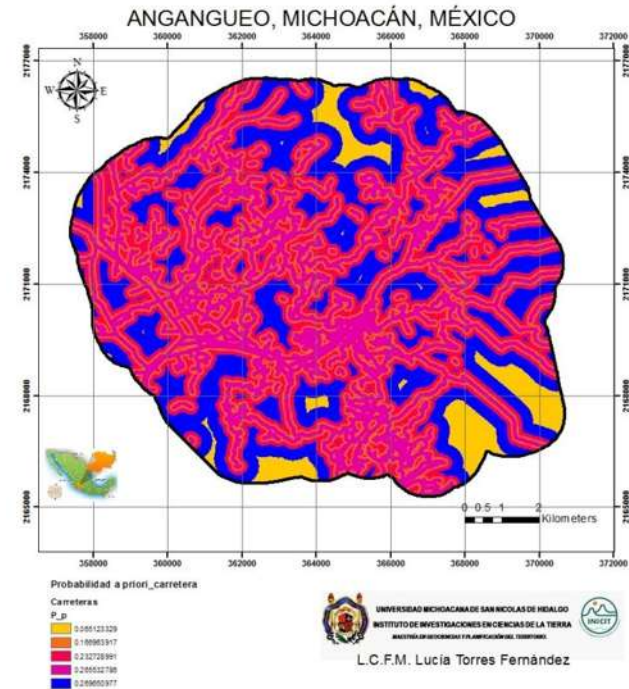
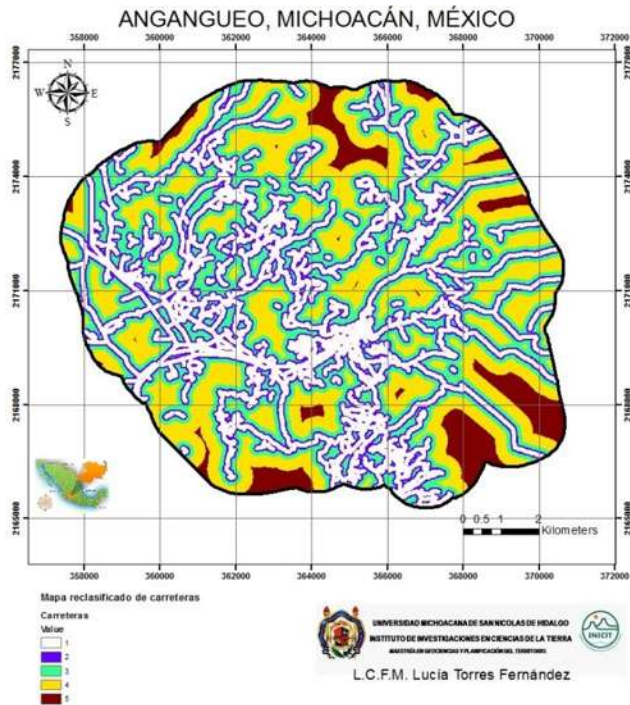


Fig. 6.21 Probabilidad a priori del mapa de distancias de carreteras.

Clasificación de la Carretera	Clase	Área de la clase	$P_p$
0 – 50	1	30821181.69	0.2648
50 – 100	2	19422055.98	0.1669
100 – 200	3	27153775.62	0.2333
200 – 500	4	31423151.07	0.2700
500 – 1100	5	7571403.252	0.0651

Tabla 6. Probabilidad a priori del mapa de distancias de carreteras. \* $p_p$  = probabilidad a priori



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

En la tabla 6 se muestran las clases del mapa de distancias de carretera. La reclasificación se realizó en base a los mismos argumentos del mapa de distancias de ríos. Entonces podemos observar que en la clase 1 y 3 es donde hay mayor recurrencia de esa clase.

**NOTA:** Al realizar los cálculos de la probabilidad a priori en el ArcGis 10 y graficarlos, los muestra en orden, es decir, no respeta cada clase, es por eso que colocamos los mapas de probabilidad a priori y el mapa reclasificado de cada factor condicionante, para corroborar que efectivamente estamos hablando de la probabilidad en la misma clase.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

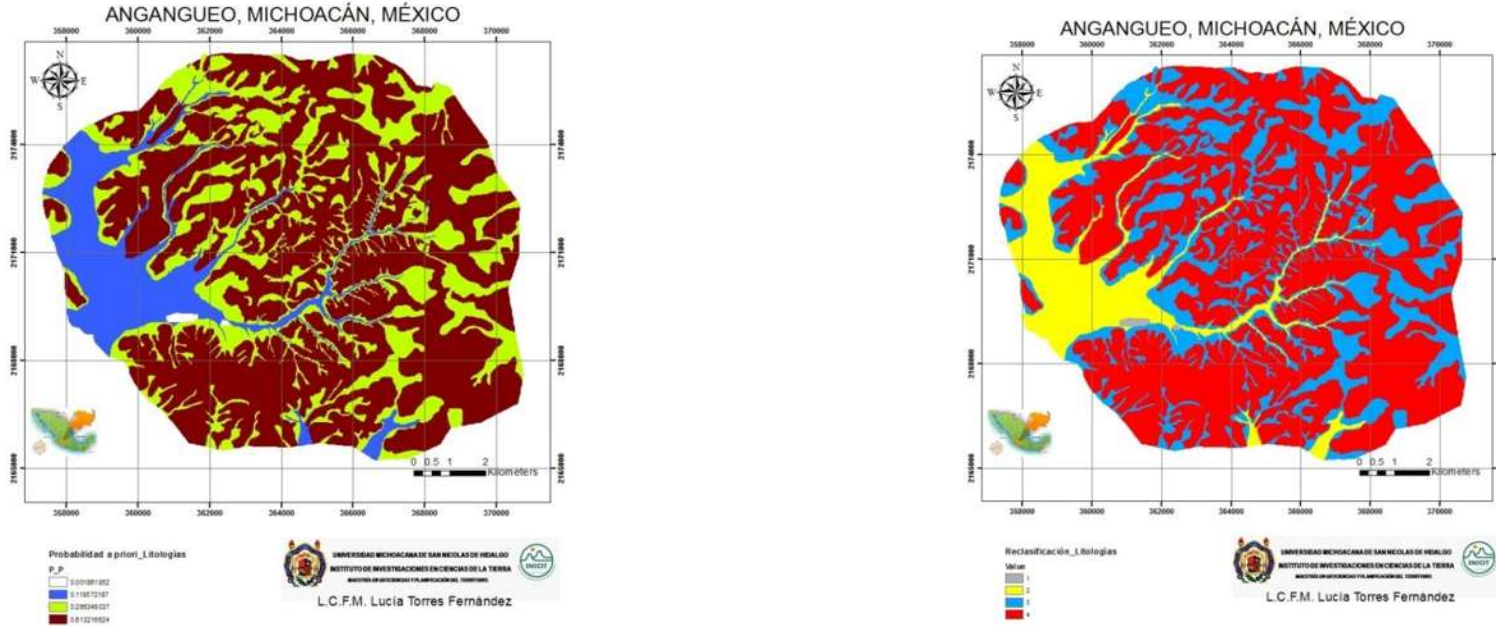


Fig. 6.22 Probabilidad a priori del mapa de litologías.

Clasificación de las Litologías	Clase	Área de la clase	$P_p$
JALES	1	223300	0.001861852
DEPOSITOS ALUVIALES-COLUVIALES	2	14230550	0.118572187
DEPOSITOS COLUVIALES	3	31971459.6	0.266349337
SUELO RESIDUAL	4	73318108	0.613216624

Tabla 7. Probabilidad a priori del mapa de distancias de carreteras.  $*p_p = \text{probabilidad a priori}$



En la tabla 7 se muestran las clases del mapa litologías. La reclasificación se realizó en base al tipo de material que se encuentra en la zona, este material cubre, las andesitas e ignimbritas. Entonces podemos observar que en la clase 3 y 4 es donde hay mayor recurrencia, la cual corresponde a los depósitos coluviales y suelo residual.

### 6.3 Cálculo de probabilidades (a priori, condicional y posteriori)

En las siguientes tablas se muestran las probabilidades calculada a priori, condicional y posteriori de cada uno de los factores condicionantes (mapas temáticos). Los valores mostrados en las áreas afectadas y áreas de la clase, se obtuvieron en ArcGis 10. Una vez obtenidos estos valores, se procedió a integrarlos en un código en MATLAB para obtener valores con una mejor aproximación para la probabilidad condicional y a posteriori (Bayes) de cada uno de los factores condicionantes. Las clases en el mapa de pendientes se tomaron en los rangos mostrados ya que era la mejor clasificación para realizar los análisis correspondientes. Al revisar los datos de la tabla 8 podemos observar que en el rango de 20° – 45° se obtuvieron las probabilidades más altas en las cuales pudimos constatar en campo que efectivamente es donde se presentaron los desprendimientos de material.

Clasificación de la Pendiente	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_p$	$P_c$	$P_a$
0-5	1	0	15885014.93242	0.1365	0	0
5-10	2	828.25036	17664132.34098	0.1518	0.0001	0.0065
10-20	3	25136.85673	38414289.20408	0.3300	0.0007	0.1979
20-45	4	101005.9612	44395299.16456	0.3814	0.0023	0.7953
45-90	5	34.08988	41241.25242	0.0004	0.0008	0.0003

Tabla 8. Probabilidad condicional de mapa de pendientes.  $*p_p$  = probabilidad a priori,  $*p_c$  = probabilidad condicional,  $*p_a$  = probabilidad a posteriori

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos en los cuales podemos observar que la mayoría de los deslizamientos se presentaron en donde se encuentra el bosque de Oyamel. En teoría se espera que la vegetación ayude a la estabilidad de las laderas, lo cual es cierto, pero cuando se presentan las condiciones como las mencionadas anteriormente, también llega un momento en que el peso de los arboles es tal que se desprende.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS**  
**MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

En la zona de estudio se presentaron deslizamientos muy grandes los cuales algunos tenían una profundidad de hasta 12 metros, y las raíces de los arboles alcanzaban aproximadamente 2 metros, es por eso que en este caso la vegetación no ayudo a la estabilidad de la ladera y los árboles se desprendieron al igual que los depósitos coluviales-aluviales y el suelo residual.

Clasificación de USV	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_p$	$P_c$	$P_a$
Bosque de Pino_Encino	1	79240.44427	40014186.1	0.3323	0.0020	0.6195
Bosque de Oyamel	2	16795.90529	34119934	0.2834	0.0005	0.1313
Erosión	3	13765.74948	5457326.01011	0.0453	0.0025	0.1076
Pastizal Inducido	4	4657.66038	3798468.82859	0.0315	0.0012	0.0364
Cuerpo de Agua	5	0	33845.42335	0.0003	0	0
Asentamiento Humano	7	2035.37242	4898142.46154	0.0407	0.0004	0.0159
Agricultura de Temporal	8	11405.7327	32085913.11371	0.2665	0.0004	0.0892

Tabla 9. Probabilidad Condicional de mapa de uso de suelo y vegetación.  $*p_p$  = probabilidad a priori,  $*p_c$  = probabilidad condicional,  $*p_a$  = probabilidad a posteriori

Como se muestra en los resultados obtenidos en la Tabla 10, se observa que las probabilidades más altas se encuentran donde hubo acumulación de humedad, pero pasa algo interesante también hay una probabilidad alta en donde hubo mayor radiación solar.

Clasificación de la Insolación	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_p$	$P_c$	$P_a$
1423.723511 - 5164.338087	1	21251.41475	8541960.29726	0.0734	0.0025	0.1673
5164.338087 - 6675.697511	2	27695.87469	17813179.62918	0.1530	0.0016	0.2181
6675.697511 - 7809.21708	3	16664.81603	35757569.60721	0.3072	0.0005	0.1312
7809.21708 - 8867.168677	4	23178.40204	30615286.20992	0.2630	0.0008	0.1825
8867.168677 - 11096.423828	5	38212.50472	23664305.83387	0.2033	0.0016	0.3009

Tabla 10. Probabilidad condicional del mapa de insolación.  $*p_p$  = probabilidad a priori,  $*p_c$  = probabilidad condicional,  $*p_a$  = probabilidad a posteriori

El mapa de ríos se generó utilizando un MDE de la zona de estudio. Para poder hacer los cálculos de probabilidades, se recurrió a generar un mapa de distancias en el cual se hizo una clasificación en los rangos que se muestran en la Tabla 11, se tomaron esos valores ya que en los



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS**  
**MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

caminamientos en campo pudimos observar que hay muchos deslizamientos superficiales y estos se encuentran entre 0 – 100 m. Entonces cuando se realizaron los cálculos necesarios se observa que efectivamente las probabilidades más altas de desprendimiento de material se presentan entre estas distancias.

Clasificación de los Ríos	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_p$	$P_c$	$P_a$
0 – 50	1	82601.21446	52200335.71	0.4485	0.0016	0.6504
50 – 100	2	21928.30248	32550593.67	0.2797	0.0007	0.1727
100 – 200	3	22473.49919	24178474.79	0.2077	0.0009	0.1770
200 – 500	4	0	3076331.261	0.0264	0	0
500 - 1700	5	0	4386179.97	0.0377	0	0

Tabla 11. Probabilidad condicional del mapa de ríos.  $*p_p$  = probabilidad a priori,  $*p_c$  = probabilidad condicional,  $*p_a$  = probabilidad a posteriori

La cartografía del mapa de carreteras se realizó en base a imágenes de satélite. De igual manera que en el mapa de ríos, al mapa de carreteras se le generó un mapa de distancias para así poder clasificarlo en los rangos que se muestran en la Tabla 12. Al analizar los resultados nos pudimos dar cuenta que los deslizamientos superficiales se presentaron entre 0 – 50 m. Pero hay algo interesante los resultados obtenidos también muestran una alta probabilidad de 100 – 200 m, y en este rango de distancia es donde se presentaron los deslizamientos traslacionales que después se convirtieron en flujo de detritos.

Clasificación de la Carretera	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_p$	$P_c$	$P_a$
0 – 50	1	42631.59272	30821181.69	0.2648	0.0014	0.3357
50 – 100	2	21237.34801	19422055.98	0.1669	0.0011	0.1672
100 – 200	3	60643.74253	27153775.62	0.2333	0.0022	0.4775
200 – 500	4	2490.33285	31423151.07	0.2700	0.0001	0.0196
500 – 1100	5	0	7571403.252	0.0651	0	0

Tabla 12. Probabilidad condicional del mapa de carretera.  $*p_p$  = probabilidad a priori,  $*p_c$  = probabilidad condicional,  $*p_a$  = probabilidad a posteriori

La concavidad es una parte importante, ya que en ella se muestra como es la forma de la ladera y por lo tanto donde es donde hubo mayor acumulación de humedad. La clasificación del mapa simplemente se realizó en 5 clases con rangos iguales. Entonces en la Tabla 13 se muestra que las



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**  
**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS**  
**MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

probabilidades más altas se presentan en la parte media de la ladera, donde no es totalmente cóncava, ni es convexa.

Clasificación de la Concavidad	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_p$	$P_c$	$P_a$
-19.20068 - -13.09138	1	0	1145.79275	0.00002	0	0
-13.09138 - -6.98206	2	0	7250.66557	0.0001	0	0
-6.98206 - -0.87274	3	51888.06972	22898973.3	0.1967	0.0023	0.4086
-0.87274 - 5.23658	4	75114.94845	93483305.7	0.8031	0.0008	0.5914
5.23658 - 11.345857	5	0	5656.98942	0.00008	0	0

Tabla 13. Probabilidad condicional del mapa de concavidad.  $*p_p$  = probabilidad a priori,  $*p_c$  = probabilidad condicional,  $*p_a$  = probabilidad a posteriori

En el área de estudio nos pudimos percatar de que no solo hay andesitas como se reporta en la literatura, sino que también hay Ignimbritas en una gran parte del municipio, pero pasa algo curioso ya que en la cartografía del mapa inventario se puede observar que la mayoría de los deslizamientos se presentan en las zonas donde predominan las andesitas, esto muy probablemente se deba a que las andesitas tienen un alto grado de meteorización pero también están cubiertas ya sea por depósitos aluviales- coluviales o por suelo residual. En la Tabla 14 podemos observar que efectivamente la mayor probabilidad se observa en el suelo residual. Aunque en el trabajo de campo se pudo observar que donde se encuentran las ignimbritas hay planos que ayudan a la estabilidad de la ladera.

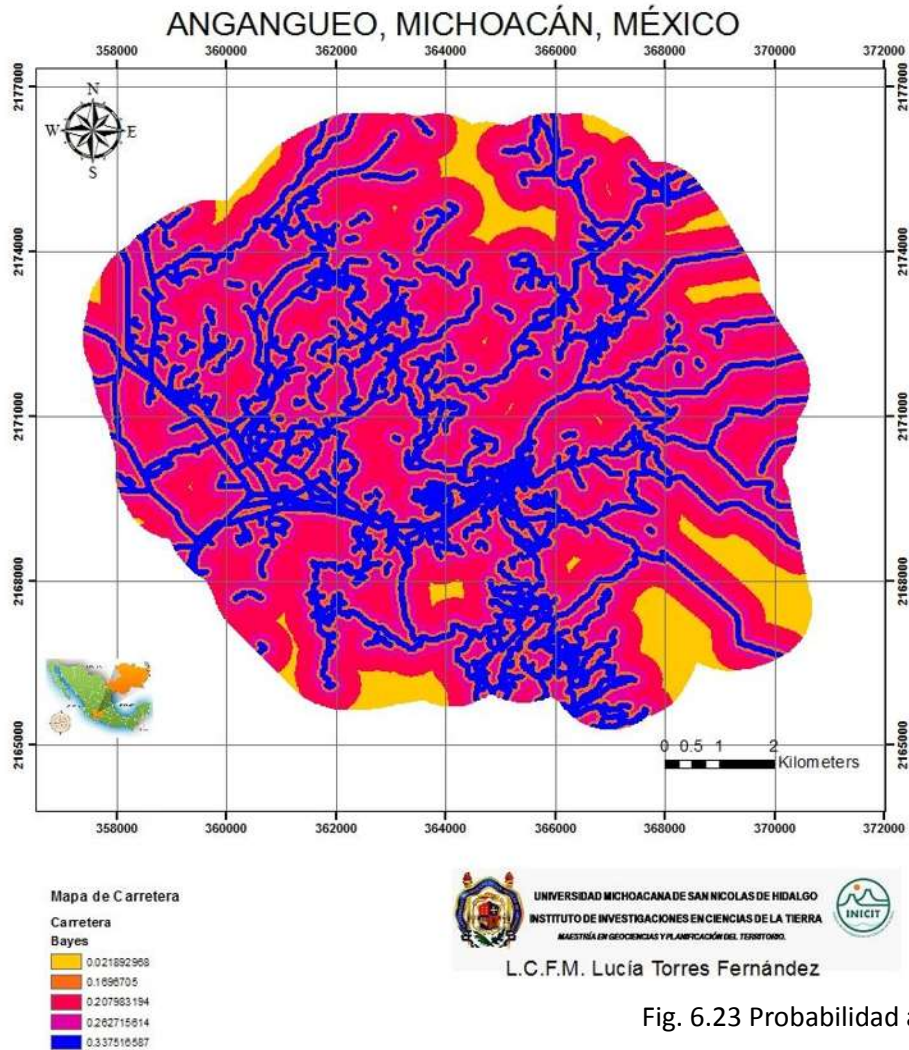
Clasificación de las Litologías	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_p$	$P_c$	$P_a$
JALES	1	0	223300	0.0019	0	0
DEPOSITOS ALUVIALES- COLUVIALES	2	2854.401621	14230550	0.1186	0.0002	0.0225
DEPOSITOS COLUVIALES	3	61063.550389	31971459.6	0.2664	0.0019	0.4807
SUELO RESIDUAL	4	63100.181896	73596777.366714	0.6132	0.0009	0.4968

Tabla 14. Probabilidad condicional del mapa de litologías.  $*p_p$  = probabilidad a priori,  $*p_c$  = probabilidad condicional,  $*p_a$  = probabilidad a posteriori

A continuación se muestra el mapa temático con la probabilidad a posteriori, y a partir de ellos llegar a la obtención del mapa de peligrosidad. En las tablas que acompañan a cada uno de los mapas, muestran los cálculos a posteriori calculados con MATLAB.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
 MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

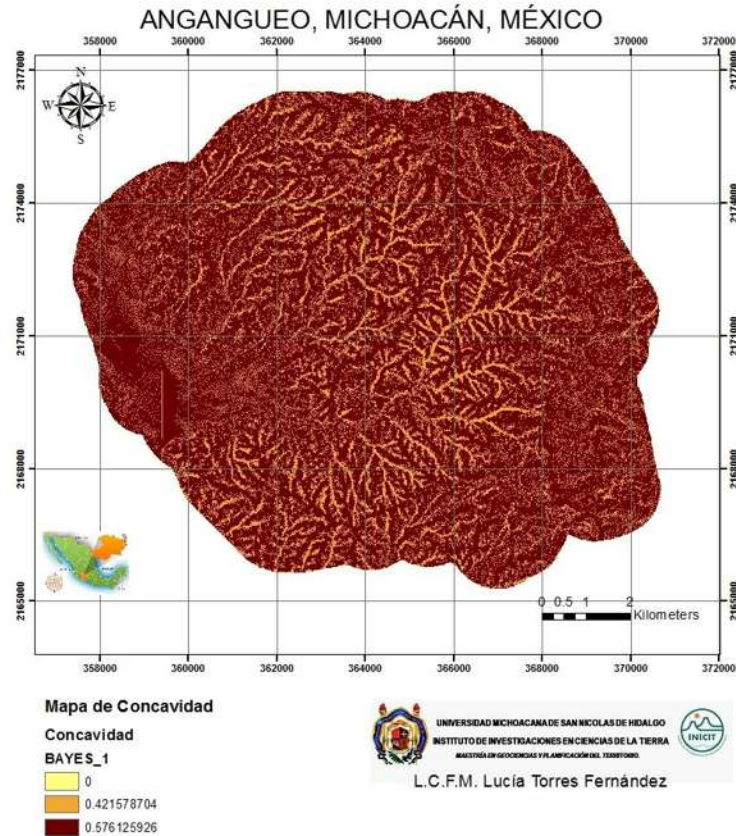


Clasificación de la Carretera	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_a$
0 – 50	1	42631.59272	30821181.69	0.3357
50 – 100	2	21237.34801	19422055.98	0.1672
100 – 200	3	60643.74253	27153775.62	0.4775
200 – 500	4	2490.33285	31423151.07	0.0196
500 – 1100	5	0	7571403.252	0

Fig. 6.23 Probabilidad a posteriori del mapa de carreteras.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
 MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

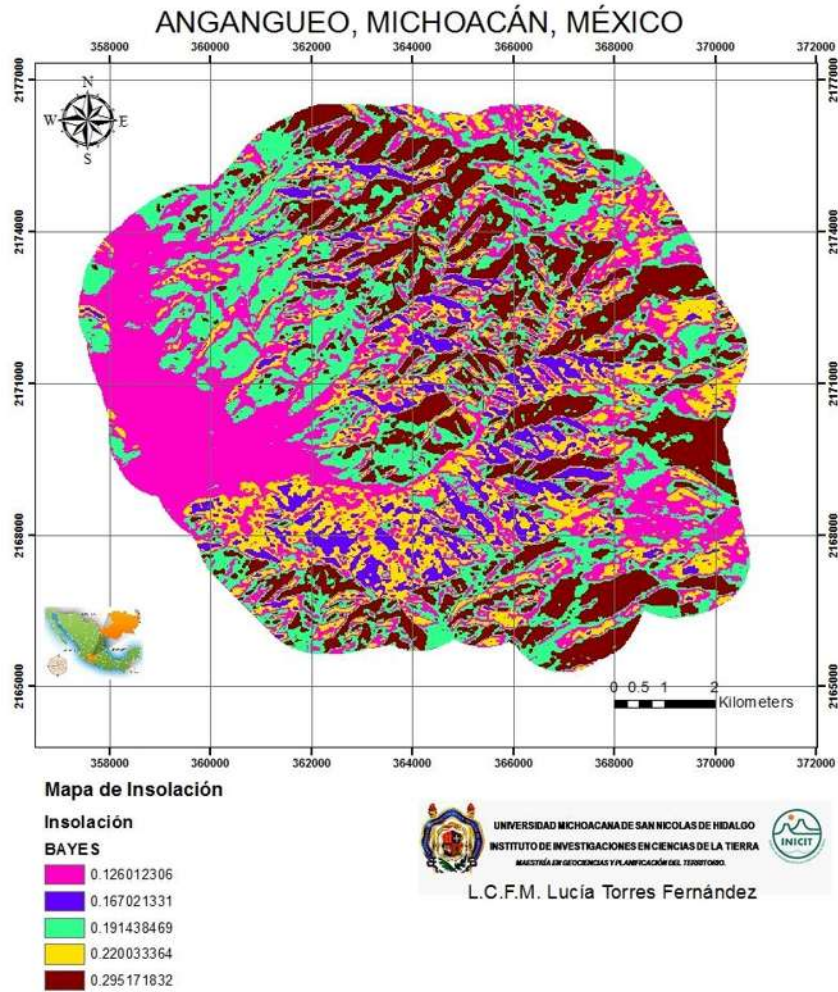


Clasificación de la Concavidad	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_a$
-19.20068 - -13.09138	1	0	1145.79275	0
-13.09138 - -6.98206	2	0	7250.66557	0
-6.98206 - -0.87274	3	51888.06972	22898973.3	0.4086
-0.87274 - 5.23658	4	75114.94845	93483305.7	0.5914
5.23658 - 11.345857	5	0	5656.98942	0

Fig. 6.24 Probabilidad a posteriori del mapa de concavidad.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

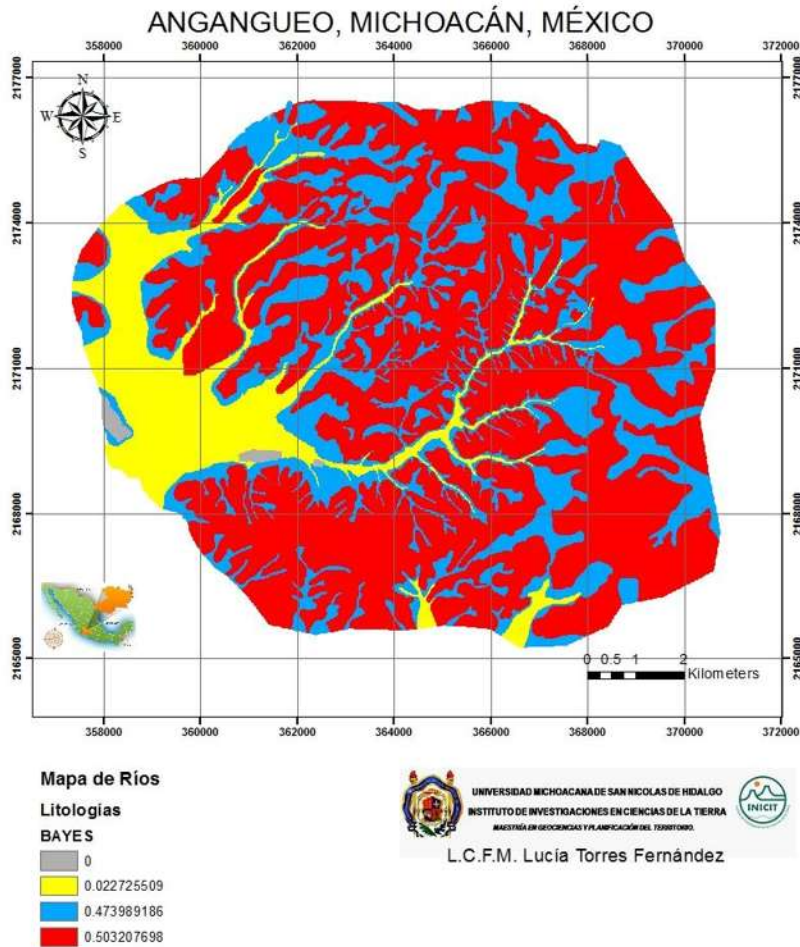


Clasificación de la Insolación	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_a$
1423.723511 - 5164.338087	1	21251.41475	8541960.29726	0.1673
5164.338087 - 6675.697511	2	27695.87469	17813179.62918	0.2181
6675.697511 - 7809.21708	3	16664.81603	35757569.60721	0.1312
7809.21708 - 8867.168677	4	23178.40204	30615286.20992	0.1825
8867.168677 - 11096.423828	5	38212.50472	23664305.83387	0.3009

Fig. 6.25 Probabilidad a posteriori del mapa de insolación.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
 MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

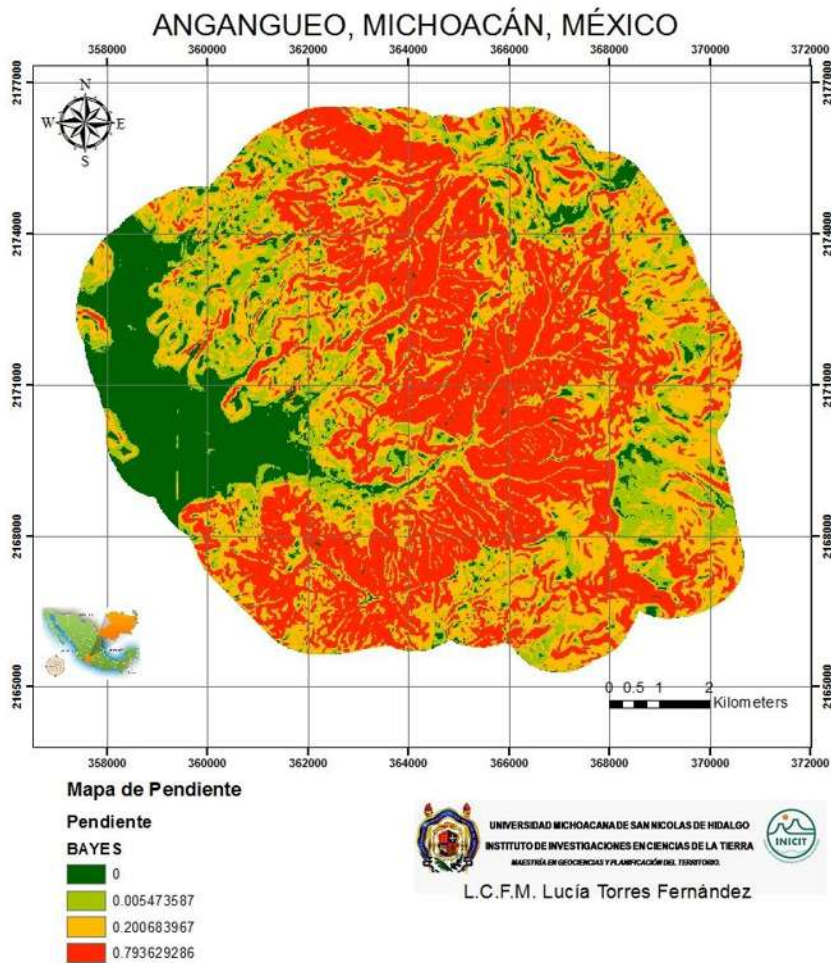


Clasificación de las Litologías	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_a$
JALES	1	0	223300	0
DEPOSITOS ALUVIALES-COLUVIALES	2	2854.401621	14230550	0.0225
DEPOSITOS COLUVIALES	3	61063.550389	31971459.6	0.4807
SUELO RESIDUAL	4	63100.181896	73596777.366714	0.4968

Fig. 6.26 Probabilidad a posteriori del mapa de litologías.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

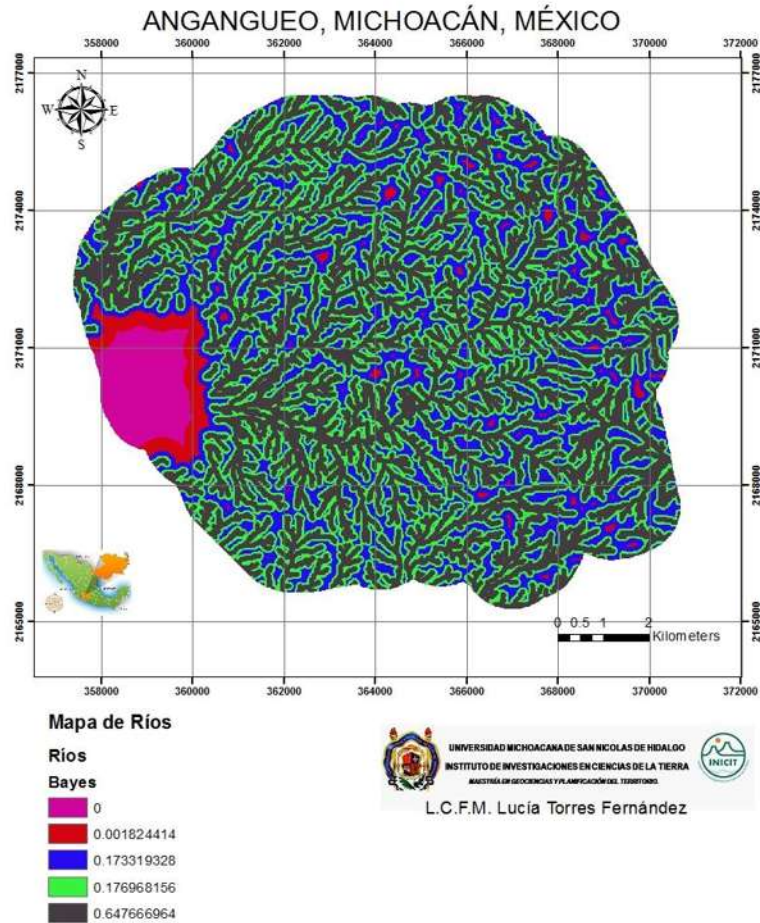


Clasificación de la Pendiente	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_a$
0-5	1	0	15885014.93242	0
5-10	2	828.25036	17664132.34098	0.0065
10-20	3	25136.85673	38414289.20408	0.1979
20-45	4	101005.9612	44395299.16456	0.7953
45-90	5	34.08988	41241.25242	0.0003

Fig. 6.27 Probabilidad a posteriori del mapa de pendientes.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
 MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

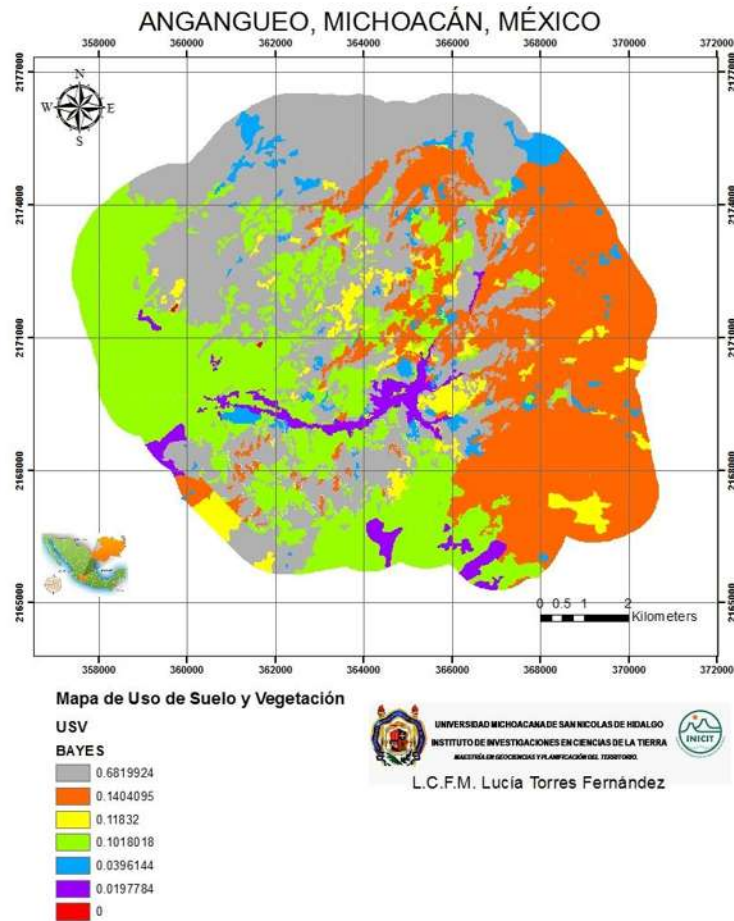


Clasificación de los Ríos	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_a$
0 – 50	1	82601.21446	52200335.71	0.6504
50 – 100	2	21928.30248	32550593.67	0.1727
100 – 200	3	22473.49919	24178474.79	0.1770
200 – 500	4	0	3076331.261	0
500 - 1700	5	0	4386179.97	0

Fig. 6.28 Probabilidad a posteriori del mapa de ríos.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**



	Clase	Área afectada	Área de la clase	$P_a$
<b>Clasificación de USV</b>				
Bosque de Pino_Encino	1	79240.44427	40014186.1	0.6195
Bosque de Oyamel	2	16795.90529	34119934	0.1313
Erosión	3	13765.74948	5457326.01011	0.1076
Pastizal Inducido	4	4657.66038	3798468.82859	0.0364
Cuerpo de Agua	5	0	33845.42335	0
Asentamiento Humano	7	2035.37242	4898142.46154	0.0159
Agricultura de Temporal	8	11405.7327	32085913.11371	0.0892

Fig. 6.29 Probabilidad a posteriori del mapa de uso de suelo y vegetación.



## 6.4 Mapa de peligrosidad

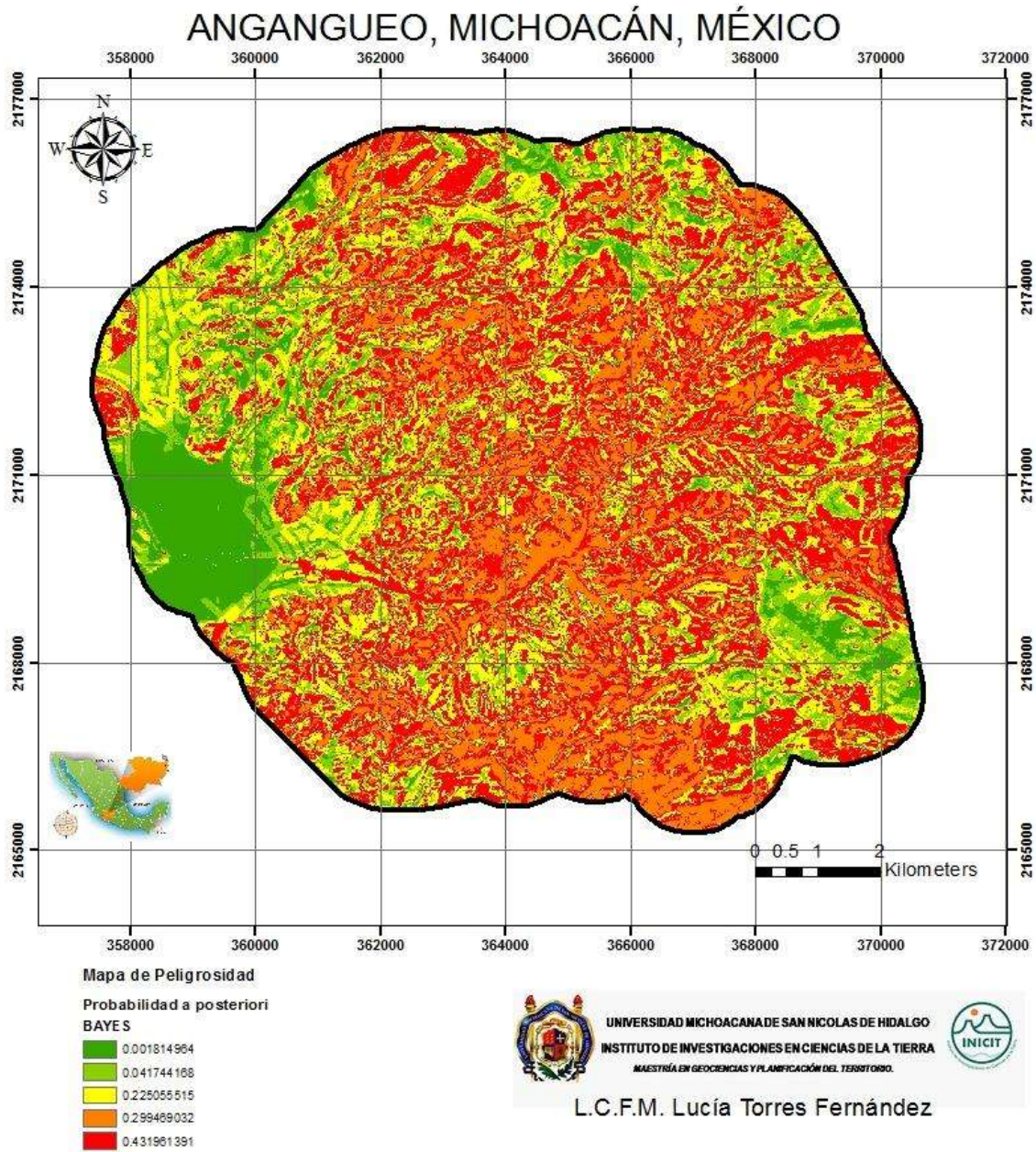


Fig. 6.23 Mapa de peligrosidad

En el mapa de peligrosidad, se observa que las probabilidades más altas, corresponden a lo que se obtuvo de manera independiente para cada uno de los mapas temáticos. Haciendo la validación con el mapa inventario y con los nuevos deslizamientos presentados en la zona de estudio, se corrobora que estos efectivamente, corresponden a las zonas de mayor probabilidad.



## 6.5 Discusión

De los resultados se siguen de manera inmediata varios hechos interesantes. El primero es que la vegetación es frecuentemente un factor importante para la estabilidad de la ladera, sin embargo, los deslizamientos producidos en el municipio de Angangueo se presentaron donde hay bosque de pino-encino.

También observamos que la radiación solar muestra la parte donde hubo mayor insolación, y se puede apreciar que hay mayor probabilidad de ocurrencia, donde hubo mayor y menor radiación.

Algo muy importante que sucedió fue que en el trabajo de campo para cartografiar la litología, encontramos Ignimbritas las cuales no habían sido reportadas en la literatura; solo en algunos trabajos realizados recientemente en el zona; en la literatura solo se reportan Andesitas.

Dentro de estos caminamientos en campo se localizó el contacto entre las litologías (Andesitas e Ignimbritas), en el cual se observa que las ignimbritas se emplazaron en las andesitas, estas tenían una dirección NE-SO.

Esto es muy importante ya que la teoría que surgió a partir de ese hallazgo fue que las Ignimbritas le dan estabilidad a la ladera, ya que los deslizamientos fueron presentados en su mayoría en la zona donde se encuentran las Andesitas. Esto también se puede constatar en base al MDE, en el que se observa que donde se encuentran las andesitas el relieve es mas abrupto, hay barrancas y pendientes pronunciadas. En cambio, donde se localizan las ignimbritas tiene un relieve más suave.

Las ventajas de aplicar un método probabilístico es que nos muestra en una forma bastante objetiva donde es más susceptible el terreno. Pero una desventaja importante es que solamente da una aproximación limitada por la cantidad de información disponible, y su aplicación no es completamente automática ya que requiere los parámetros que nosotros le proporcionamos. Dado que en el área de estudio los factores condicionantes pueden cambiar, ya sea con una nueva construcción carretera, cambio de uso de suelo, mayor radiación solar, etc., los resultados obtenidos tienen que adecuarse al tomar en cuenta los nuevos valores para cada uno de los mapas temáticos.

Es muy importante destacar que los resultados obtenidos son consistentes con lo observado en campo. Donde ha habido deslizamientos recientes (ver anexos), también se ratifican estos resultados con el mapa inventario, ya que si hacemos una sobreposición entre el mapa de



peligrosidad y el inventario, se puede apreciar que los desprendimientos de material caen donde hay mayor probabilidad.

## CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al realizar este trabajo de investigación, se plantearon varias preguntas, las cuales se fueron respondiendo mientras se realizaba dicho trabajo. Algunas de las preguntas fueron: ¿cuáles serían los factores condicionantes que se tomarían en cuenta para esta investigación?, ¿qué metodología aplicar?, ¿qué orden se llevaría en el cronograma de actividades?, ¿se cumplirían los objetivos del trabajo?, ¿Dónde se presentaría el trabajo?

Durante el desarrollo de este trabajo, se presentaron varios inconvenientes; el principal fue la dificultad para conseguir la información necesaria. Una vez obtenida fue de vital importancia editarla, ya que dicha información estaba cartografiada de forma diferente a lo que se observó en campo. También tuvimos algunos inconvenientes técnicos, ya que al procesar los datos, el costo computacional era un poco alto. También el análisis con el SIG utilizado (ArcGis 10) presentó algunos errores, para lo cual se tuvo que reinstalar el programa.

Observando a la morfología y litología del área de estudio y los resultados obtenidos, podemos decir que hay una gran probabilidad de que se produzcan nuevos deslizamientos y se reactiven los presentados en el 2010, entre los que destacan los deslizamientos traslacionales, rotacionales, flujos de detritos y flujos de lodo. Sin embargo, no se descarta la posibilidad de que algún deslizamiento de otro tipo pueda generarse debido al alto grado de alteración y fuertes pendientes que la Sierra de Angangueo presenta.

Los deslizamientos ocurridos sobre el área de estudio se debieron a una combinación de los siguientes factores naturales: morfología, topografía, litología, tipo de uso de suelo, además, los factores antrópicos que incluyen la deforestación, la mala planificación territorial y el cambio en el uso del suelo. Se sabe que el factor detonante de estos deslizamientos fueron las lluvias atípicas.

En particular en el municipio de Angangueo la probabilidad más alta, se registra en donde se encuentra el bosque de pino-encino, lo que nos indica que en este caso la vegetación, no ayudó a la estabilidad de la ladera.

Todo parece indicar que las ignimbritas ayudan a la estabilidad de la ladera ya que cuenta con planos que proporcionan dicha estabilidad.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

Las andesitas al contar con un alto grado de meteorización ayudaron a que el agua se infiltrara de manera más rápida y así se produjera el desprendimiento de material.

También se observó que los deslizamientos fueron presentados en las zonas de las laderas que recibieron menor radiación solar están orientadas al norte, en lo cual la teoría nos indica que hubo mayor humedad. Las partes cóncavas de la ladera también presentan acumulación de humedad y esto se puede comprobar en campo.

En base a los análisis probabilísticos para cada uno de los factores condicionantes tomados en cuenta para este trabajo, se observó que las pendientes entre 20° y 45° es donde hay mayor probabilidad de desprendimientos de material. También observamos que los deslizamientos se presentaron en donde se encuentra el bosque de pino-encino. La mayoría de los deslizamientos superficiales fueron detonados por la erosión y los factores antropogénicos.

La mayor probabilidad del desprendimiento de material también se registró donde se cartografió el suelo residual y los depósitos aluviales-coluviales. Esto es debido a que es un material no consolidado y tiene mayor permeabilidad.

En el trabajo de campo se observaron nuevos deslizamientos y otros que han sido reactivados. Esto por una parte ayuda al trabajo ya que no tendremos que esperar a que se presente otro evento como el del 2010. Pero esto también nos indica que la zona es muy inestable y tiene un alto riesgo para la población.

Donde fueron reubicadas las personas afectadas por los deslizamientos ocurridos en el 2010 también existe un riesgo potencial ya que el agua se infiltra de manera muy rápida y esto puede ayudar a que se detonen nuevos deslizamientos en la zona.

Algunas recomendaciones son que la población tiene que estar alerta, de tal forma que se percaten si algo inusual está pasando en el terreno.

También es sumamente importante que la población conozca los peligros y las zonas en riesgo potencial a que ocurran deslizamientos.

Como trabajo a futuro se puede aplicar esta metodología a los factores condicionantes, pero sin clasificar cada uno de los mapas temáticos.

También realizar un trabajo pero integrando la precipitación, ya que esto puede arrojar mejores resultados, acerca de las zonas que tienen mayor probabilidad de ocurrencia.

Angangueo por ser un municipio que se localiza en el Cinturón Volcánico Trans Mexicano (CVTM) tiene relieves muy pronunciados y en combinación con los diferentes factores condicionantes y detonantes, es una zona con un riesgo potencial a que ocurran deslizamientos.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aleotti, P., Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58, 21-44.
- Ayala, F.J., Corominas, J. (Eds.), 2002. Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. IGME, Serie Medio Ambiente Nº 4, Madrid.
- Ayala-Carcedo, F., Corominas, J. (Eds.). (2003): Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. IGME, Serie: Medio Ambiente. *Riesgos Geológicos*, 4, 191 pp.
- Brass, A., Wadge, G., Reading, A.J., “Designing a Geographical Information System for the prediction of landsliding potential in the West Indies”. *Proced.: Economic Geology and Geotechnics of Active Tectonic Regions*. University College, London, 3-7 April, 13 p. 1989.
- Trujillo, N., 2014. Geología estructural e identificación de zonas de peligros en la región de Angangueo-Zitácuaro, Michoacán, Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro.
- Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P., 1995, GIS technology in mapping landslide hazard, En: Carrara A, Guzzetti F (Eds) *Geographical information systems in assessing natural hazards*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. 135-175 p.
- Chung C.F., Fabbri, A.G., 1993, The representation of geoscience information for data integration, *Nonrenewable Resources*, V. 2:2, 122-139 p.
- CONAGUA, 2010. Restauración hidrológica ambiental de la microcuenca de aporte a la población de Mineral de Angangueo, Michoacán, (microcuenca El Charco); mediante la implementación de prácticas MAPS.
- Elkateb, T., Chalaturnyk, R., Robertson, P. 2003, An overview of soil heterogeneity: quantification and implications on geotechnical field problems. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(1), pp. 1–15.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., Reichenbach, P., 1999, Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31:181–216.
- Hutchinson, J.N., 1968, Mass Movement. In *The Encyclopedia of Geomorphology* Fairbridge, R.W., ed., Reinhold Book Corp., New York, pp. 688-696.
- Luzi, L., Fabbri, A.G., 1995, Application of Favourability Modelling to Zoning of Landslide Hazard in the Fabriano Area, Central Italy. 1st. Joint European Conference and Exhibition on Geographical Information, The Hague, NL. 398-403 p.
- MahdaviFar, M.R., 2000, Fuzzy information Processing in Landslide Hazard Zonation and Preparing the Computer System. En: A.E. Bromhead, N. Dixon and M.L. Ibsen (Eds): *Landslides in research, theory and practice*. Tomas Telford. London. 2, 993-998 p.
- McGuire AD., Apps M., Chapin, FS. III, Dargaville, R., Flannigan, MD., Kasischke, ES., Kicklighter, D., Kimball, J., Kurz, W., Mcrae, DJ., Mcdonald, K., Melillo, J., Myneni, R., Stocks, BJ., Verbyla, DL., Zhuang, Q., 2004, Land cover disturbances and feedbacks to the climate system in Canada and Alaska, Chapter 9 In: Gutman G, Janetos AC, Justice CO, Moran EF, Mustard JF, Rindfuss RR, Skole D, Turner II BL, Cochrane MA Dordrecht (eds) *Land Change Science: Observing, Monitoring, and Understanding Trajectories of Change on the Earth's Surface*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp 139–161.
- Moore, I. D., R. B. Grayson, and A. R. Landson, 1991, Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. *Hydrological Processes* 5: 3–30.
- Morgan, B. W., 1968, *An introduction to Bayesian statistical decision process*, Ed. Prentice-Hall, New York. 116 p.
- Morris H. Degroot, Carnegie-Mellon, 1986, *Probability and Statistics*, University Staff, Hardcover.



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

- Murphy, W., Vita-Finzi, C., 1991, Landslides and seismicity: an application of remote sensing. Proc. 8th. Thematic Conference on Geological Remote Sensing (ERIM), Denver, Colorado, USA. 2, 771-784 p.
- Okimura, T., Kawatani, T., 1986, Mapping of the potential surface-failure sites on granite mountain slopes, En: V. Gardiner (Editor), International Geomorphology. Part 1. Wiley, New York. 121-138 p.
- Ramírez, I., 2001, Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-200. Inv. Geogr. 45: 39-55.
- Ramírez, I., 2001, Los espacios forestales de la sierra de Angangueo (estados de Michoacán y México), México: una revisión geográfica. Tesis de doctorado.
- Soeters, R., Van Westen, C.J., 1996, Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: Turner AK, Schuster RL (eds) Landslides: investigation and mitigation. Transportation Research Board Special Report 247, pp 129–177.
- Ward, T.J., Ruh-Ming, Li, Simons, D.B., 1982, Mapping landslide hazards in forest watershed, Journal of Geotechnical Engineering Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers, 108 (GT2), 319-324 p.
- Zevenbergen, L. W., Thorne, C. R., 1987, Quantitative Analysis of Land Surface Topography, Earth Surface Processes and Landforms 12: 47–56.
- Mapa de Uso de Suelo y Vegetación, 2010, Comisión Forestal de Michoacán (COFOM).
- Modelo Digital de Elevaciones (MDE), Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).
- Catálogo de ArcGis, 2010,  
<http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z0000001t000000>
- Definición, lluvias, <http://www.amis.org.mx/lluvias/index.html>
- Shafer, G., 1976, A Mathematical Theory of Evidence, Princeton University Press, Princeton N.J. 297 p.



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

- Zadeh, L.A., 1978, Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, Fuzzy Sets and Systems. 1, 3-28 p.
- Varnes, D.J., 1978, Slope Movement: Types and Proceses. In Scuster & Krizek, 1978: Landslides: Analysis and Control. Special report 176. Transportation Research Board, Comisión on Sociotechnical Systems, National Research Council. National Academy of Sciences, Washungton, D.C. 234 p.p.
- Hansen, A., 1984, Landslide hazard analysis. En: D. Brundsen and D.B. Prior (Editors), Slope Stability. John Wiley and Sons, 523-602 p.
- Heckerman, D., 1986, Probabilistic interpretation of MYCIN's certainty factors. En: L.N. Kanal and J.F. Lemmer (editors) Uncertainty in Artificial Intelligence. Elsevier, 167-196 p. 1986.
- Hansen, A., Franks, C.A.M., 1991, Characterization and mapping of earthquake triggered landslides for seismic zonation. Proceed. IV. Int. Conf. Seismic Zonation, Stanford, California, 149-195 p.
- Van Westen, C.J., 1993, Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation, ITC- Publications nº 15 ITC, Enschede. 45 p.
- Chung, C.F., Leclerc, Y., 1994, A quantitative technique for zoning landslide hazard, En: Int. Ass. Math. Gol. Annual Conf., Mont Tremblant, Quebec, Canada. 3-5, 87- 93 p.
- Hauser, A., 1997, Los aluviones del 18 de junio de 1991 en Antofagasta: Un análisis crítico a cinco años del desastre. Boletín Nº 49. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Burrough, P. A., and McDonell, R. A., 1998. Principles of Geographical Information Systems (Oxford University Press, New York), 190 pp.
- Aguilar-Garduño E., Santillán H., Salgado M., Martínez M., 2010, Análisis técnico de la vulnerabilidad hidrológica ante el crecimiento urbano. Caso de Anganguero, Mich. IMTA.

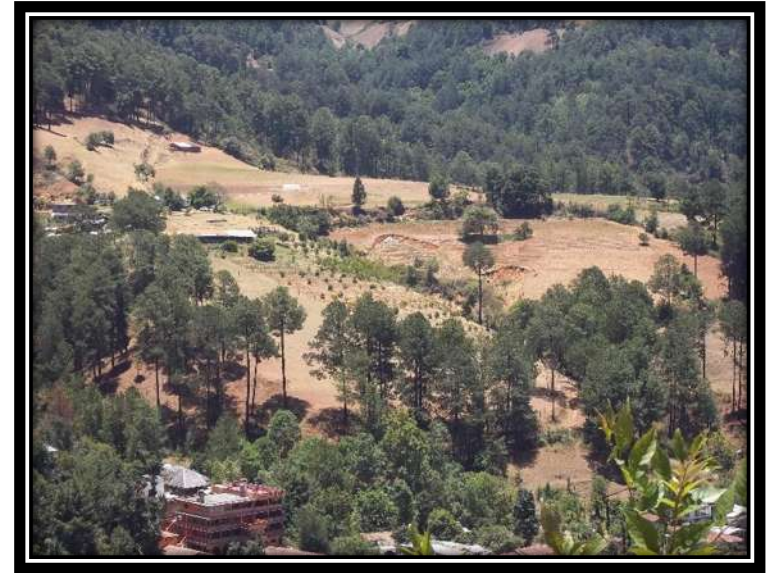


**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

- De la Luz, A., 2011, Análisis y definición de tipos de deslizamientos y sus zonas de susceptibilidad en la microcuenca el Ventilados, Angangueo, Michoacán, México. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Bermúdez, M., 2012, Geomorfología de Deslizamientos en la Cuenca del Río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro.
- Núñez, A., 2012, Inventario De Flujos De Detritos Y Su Relación Con La Hidrografía Y Geología En La Cuenca Del Río Tuzantla, Mich. Instituto Tecnológico Superior de Tacámbaro.
- Garduño, E., 2013, Identificación de eventos excepcionales, a través de análisis de anillos de crecimiento de los árboles en el margen de los ríos Catingón y San Pedro en Angangueo, Michoacán, México, UMSNH.
- Cortes, M., 2013, Propiedades edáficas y su relación con la estabilidad de la estructura de los suelos d Angangueo. UMSNH.
- Figueroa S., 2013, Estudio del Peligro por flujos de detritos y corrientes hiperconcentradas mediante simulación numérica en FLO-2D, caso de estudio: Angangueo, Michoacán, UMSNH.
- Matheron, G., 1962. Traité de géostatistique appliquée. Tome 1, Editions Technip, Paris, 334 pp.
- Zadeh, L.A., 1965, Fuzzy sets, IEEE Information and Control. 8, 338-353 p.



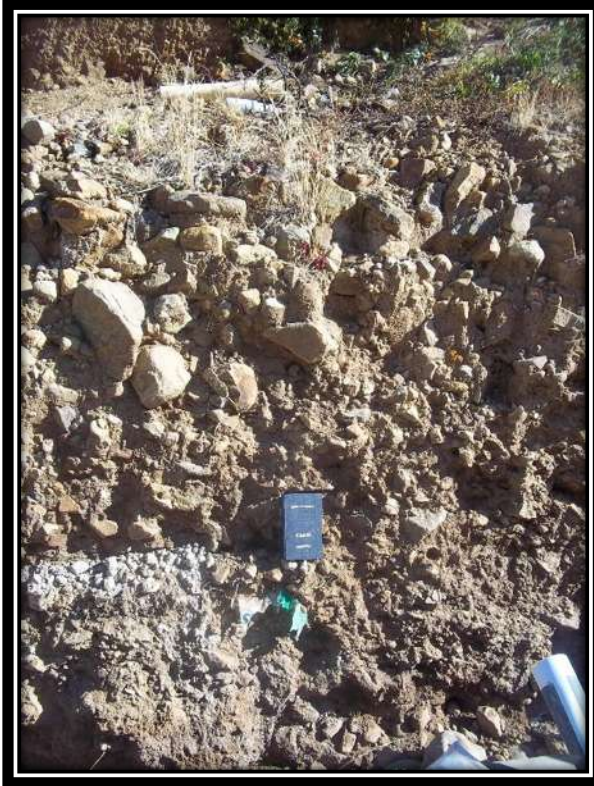
## ANEXOS



Las siguientes imágenes muestran deslizamientos resientes, no son profundos. En la imagen superior izquierda se muestra un deslizamiento reciente. Imagen superior derecha se muestra un deslizamiento reactivado y uno reciente. Imagen inferior



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO



Se observa una secuencia estratigráfica de al menos 3 estratos. En la parte superior se encuentran los depósitos del 2010, abajo se encuentran depósitos aluviales - coluviales, lo que nos indica que hubo al menos dos eventos. Pero en el fondo de la columna se observan residuos de un incendio.



Deslizamiento del Cerro Guadalupe



Concavidad de la ladera



Deslizamiento antiguo



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS  
MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO



Deslizamientos superficiales. El flujo de lodo en el Cerro del Melón.



Limite que alcanzaron los flujos de detritos del 2010

Deslizamiento producido por la mina, pero este deslizamiento está afectando un camino.

