



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE REMOCIÓN EN
MASA EN LA RED CARRETERA DE LA SIERRA
NORORIENTAL, PUEBLA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A:

JOSÉ ALEJANDRO GALINDO SERRANO

ASESOR: DRA. IRASEMA ALCÁNTARA AYALA

MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA, 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIAS

*¡Inténtalo de nuevo! Dios no ha dicho
que sea fácil, pero si dice que te esfuerces
porque Él siempre estará contigo.*

(Isaías 41:10)

A mi **Dios**, a quien tanto adoro y por estar siempre a mi lado.

A mis padres **Alicia** y **Adán**, por ser las personas más importantes de mi vida,
gracias por su amor, comprensión, atención, apoyo y esfuerzos. ¡Los quiero!

A mi abuelo **Ángel** (Papá Grande) (†), por ser el mejor ejemplo y el hombre
que más he admirado.

AGRADECIMIENTOS

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por permitirme ser parte de ella, por pasar momentos muy gratos dentro de sus instalaciones y por haber tenido la dicha de estudiar en la mejor carrera que existe: *Geografía*.

A mi asesora y estimada profesora, **Dra. Irasema Álcantara Ayala**, por todo el apoyo, el tiempo, dedicación y consejos para realizar un buen trabajo. Por esos buenos momentos de convivencia, por toda su confianza y sobre todo por brindarme su amistad.

Al **Dr. Luis Chías Becerril**, por todo su apoyo y consejos. Por permitirme ser parte de su equipo de trabajo, por introducirme al campo laboral de la geografía y ser el principal impulsor de mi formación profesional.

A los miembros del sínodo:

A mi profesor, **Dr. José Lugo Hubp**, por introducirme al grandioso mundo de la *Geomorfología*, por aquellas clases que tanto me gustaron, por esos momentos de convivencia, y por las observaciones y sugerencias para mejorar este trabajo.

A mi profesor, **Dr. Genaro Correa Pérez**, por todas sus enseñanzas dentro del salón de clase y en el campo, por fomentarme las bases de la *Geografía* al inicio de la carrera y por las valiosas aportaciones y sugerencias para esta tesis.

A mi profesora, **Lic. Ana Elsa Domínguez Ceballos**, por esas agradables clases, por sus anécdotas e historias y por las buenas recomendaciones y observaciones para sacar adelante esta tesis.

Al **Mtro. José Morales Santos**, por sus consejos, observaciones y sugerencias para mejorar este trabajo. Mil gracias.

Esta tesis fue elaborada en el marco del proyecto CONACYT 156242 "**MISTLI: Monitoreo, Instrumentación y Sistematización Temprana de Laderas Inestables**". Mis agradecimientos.

Al **Instituto de Geografía**, por brindarme un espacio en donde realicé mis actividades académicas, por el uso de equipo e instalaciones y sobre todo por el apoyo recibido por medio de la Beca "**María Teresa Gutiérrez de MacGregor**".

A la **Facultad de Medicina**, y en particular al **Ing. Genaro Sánchez** y al **Dr. Juan José Mazón** por permitirme desarrollar dentro de su institución mis labores de geógrafo y habilidades en cartografía digital.

A mi profesora de *Geografía Económica* de la E. N. P. Núm. 8, **Esther Serrano Rodríguez**, quién fue la responsable de que estudiara esta carrera. Mil gracias.

A toda mi familia:

Tía Amalia gracias por todos esos regañíos y consejos que me da para ser un hombre de bien. **Tío Pablo** gracias por ser mi amigo, por su confianza y ejemplo. **Abuela Cata** te agradezco tus atenciones, consejos y preocupaciones. A todos gracias por su sabiduría, por su cariño y ser parte de mi vida.

A todos los miembros de mi familia de Santiago, el D.F., Poza Rica, el Veinticinco y Reynosa, que siempre me han apoyado en todo, por esas buenas reuniones, por su cariño, por su preocupación y por fomentar la unión familiar. En especial mis agradecimientos a **Fernando Delgado F.**, **Reyna Serrano**, **Claudia Serrano**, **Alejandro Galindo R.** **Ana Serrano**, **Edith Hernández**, **Miguel Ángel Galindo R.**, **Pablo Miguel Ramírez**, **Gonzalo Arenas B.**, **Cata Peñafiel** y **Socorro Serrano**. A todos mis primos y primas, gracias.

A todas aquellas grandiosas personas que conocí durante mi formación profesional:

A mis amigos y colegas del cubículo de *Geografía Física*, los cuales siempre me apoyaron, pasamos momentos divertidos y de alguna manera permitieron que este trabajo saliera adelante. Muchas gracias geógrafos y biólogos: **Matilde Cruz**, **Antonio Contreras**, **Alfonso Carbajal**, **Maviael Velázquez**, **Liz Lerma**, **Gema Velásquez**, **Ixtlitzin Bravo**, **Guadalupe Hernández**, **Jesús Sánchez**, **Maribel Blancas** y **Alex Escalante**.

Asimismo agradezco especialmente al **Biól. Pablo Leautaud V.** (mi maestro en SIG), por compartirme todos sus conocimientos y por su valiosa ayuda en el desarrollo de este trabajo. Al **Mtro. Ricardo Garnica** por el apoyo técnico, por proporcionarme las herramientas necesarias y por instruirme las bases metodológicas para el desarrollo de este trabajo. A el **Geog. Hazziel Padilla**, por su apreciada ayuda, sus consejos y recomendaciones para desarrollar este trabajo. A mi estimado amigo, **Geog. Felipe Juárez Villanueva**, por su invaluable ayuda, por soportar el trabajo de campo y por sus recomendaciones y amenazas que permitieron mejorar este trabajo. Y sobre lo demás a **todos** gracias por su amistad.

A mis queridos amigos de la Prepa 8, por esos años de amistad y esos momentos especiales que han compartido. Muchas gracias **Federico García P., Gerardo Martínez, Dulce García, Ajna Labra y Christian Mendoza.**

A mis preciados amigos, también de la Prepa 8, por todos estos años de diversión, convivencia, peleas, rivalidad y entretenimiento. Mil gracias por su amistad, **Jorge Luis Núñez, Álvaro Hernández López, David Isaías Martínez, Roberto Said Pérez, Fernando García Carbajal y Noé García.**

A mis estimados amigos que me brindaron su compañerismo al inicio de la carrera y con los que compartí grandes momentos. Gracias por todo, **César Téllez, Oscar Daniel Rivera, Ricardo Macedo y María Jose Rodríguez.**

A mis amigos del cubículo 18 de Geografía Económica, por esos buenos momentos de compañerismo y trabajo. Gracias por su amistad, **Rene Cruz, Bruno Contreras, Daniel Tenorio, Adriana Lizet Rocha, Adriana Careli Caballero y Arturo Cruz.** Un agradecimiento especial a **Miguel Camarena García**, por sus consejos para ser un mejor profesionalista.

A mis queridas amigas de la carrera, gracias por su apoyo y agradables momentos, **Mayra Cruz, Gabriela Castillo Alfaro, Magdiel Barrios, Julieta López García, Viridiana De Mendoza, Adriana B. Galindo, Ángeles Azpeitia y Leslie Islas V.**

Agradezco especialmente a **Hilcias Berthely Serrano** por su amistad, su confianza, su motivación, por esos buenos momentos que compartimos en nuestras actividades laborales y académicas. Mi gratitud para **Fabiola Jiménez Castillo**, por su valioso apoyo en todos los aspectos y esos gratos momentos de convivencia. Mi agradecimiento a **Daniela Romero Rico**, por ser la culpable y responsable de que diera dos pasos importantes durante el transcurso de la carrera, muchas gracias por tus consejos. A todas, las quiero!

A mis camaradas e invaluable amigos de la carrera, **Roberto Huerta, Arturo Godínez, Israel Rosas, César Cervantes, Sergio Soriano, Noé Jerónimo, Marco Antonio Pablo P., Ernesto Lara, Armando Trejo, Rodrigo Sandoval y Alejandro Velasco**. Gracias por su apoyo y gratos momentos durante el transcurso de la carrera.

A mis estimados amigos, que desafortunadamente pertenecieron a otra universidad, sin embargo, son personas geniales. **Miguel Amador** gracias por esos regaños, consejos y compañerismo que hacían que el trabajo fuera menos tedioso. **Mario Alfredo Mercado A.** gracias por tantos años de amistad y por esos viajes que continuaremos realizando a los diversos lugares.

A mis profesores que influyeron de manera importante en mi formación académica: **Prof. Francisco Hernández Hernández** gracias por los valiosos conocimientos en cartografía e interpretación de mapas. **Dr. Enrique Propin Frejomil** le agradezco el excelente curso que permitió dar inicio a esta tesis. **Dr. Álvaro Sánchez Crispin** gracias por las clases de Geografía Económica que tanto me gustaron, por las tareas y mapas que criticaba cada semana y por aquella práctica de campo al norte de país, la mejor de todas. **Prof. Alfredo Victoria Cerón** muchas gracias por todos esos conocimientos geográficos que mostró en campo, y por esas prácticas de campo que me permitieron conocer varios rincones del país, en las cuales pude aprender y valorar sobre las diversas problemáticas en las que se encuentra cada lugar.

A **Octavio Salazar** del municipio de Teziutlán, por su disposición y apoyo durante el trabajo de campo y a **Rubén Acebo** de Protección Civil de Puebla, por los datos proporcionados para realizar esta investigación.

A investigadores y personal del Instituto de Geografía que de manera directa e indirecta aportaron su valiosa ayuda para realizar este trabajo: **Dr. José López García, Cony Reyes, Elena Guzmán Cruz, Arcelia Ávila, Dra. Susana Padilla, Biól. Armando Peralta, Roberto Borja, Dr. Fernando Aceves, Mtra. Oralia Oropeza Orozco y Mayeli Juárez.**

Gracias,

Alejandro Galindo

"Solo eres estudiante una vez en la vida, decide bien lo que es lo que quieres hacer"

(Anónimo)

"Aquel que no ha fracasado nunca, es que no ha intentado nada"

(Agustine Og Mandino)

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
I. OBJETIVOS	2
II. ESTRUCTURA DE LA TESIS	2
III. ÁREA DE ESTUDIO	3
CAPÍTULO 1. PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA (PRM)	10
1.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES	10
1.2 TIPOLOGÍA	10
1.2.1 Caídas o desprendimientos	11
1.2.2 Vuelcos o desplomes	12
1.2.3 Deslizamiento	13
1.2.4 Flujos	14
1.2.5 Expansiones laterales	15
1.2.6 Movimientos complejos	16
1.3 FACTORES DETERMINANTES DE LA INESTABILIDAD DE LADERAS	17
1.4 MECANISMOS DETONANTES	18
1.5 SIGNIFICADO DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA	19
1.6 DESASTRES ASOCIADOS A PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA	20
1.6.1 Concepto de desastre	20
1.6.2 Desastres y eventos asociados a PRM a nivel mundial	20
<i>El alud en la cuenca del Río Limón, Venezuela</i>	21
<i>La catástrofe del deslizamiento de La Josefina, Ecuador</i>	21
<i>Deslizamiento en la Autopista Núm. 3 de Taiwán</i>	22
<i>El deslizamiento de Maierato, Italia</i>	24
1.6.3 Desastres y eventos asociados a PRM en México	26
<i>El desastre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla</i>	26
<i>El Huracán Stan</i>	28
<i>Deslizamiento en Santa María Tlahuitoltepec, Oaxaca</i>	31
<i>Derrumbe en la Autopista México-Querétaro</i>	32
CAPÍTULO 2. MÉTODOS, TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS: DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA	33
2.1 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)	33
2.1.1 Definición de SIG	34
2.1.2 Componentes de un SIG	35
2.1.3 Tipos de datos en un SIG	36
2.2 CAPAS BASE	38
2.2.1 Geología	39
2.2.2 Edafología	39
2.2.3 Uso del suelo	40
2.2.4 Pendiente	41
2.2.5 Densidad de disección	41
2.2.6 Profundidad de disección	42
2.2.7 Geometría o forma de la ladera	42
2.2.8 Orientación de la ladera	43
2.3 INVENTARIO DE PRM	52

2.3.1 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)	52
2.3.2 Trabajo de campo	53
2.3.3 Percepción Remota	54
2.3.4 Construcción de la base de datos espacial	56
2.4 METODOLOGÍAS PARA DETERMINAR LA SUSCEPTIBILIDAD A PRM	59
2.4.1 El Análisis Multicriterio	59
<i>Procedimiento</i>	60
2.4.2 Pesos de Evidencia	65
<i>Procedimiento</i>	66
2.4.3 Análisis y resultados	70
CAPÍTULO 3. SUSCEPTIBILIDAD DE LA RED CARRETERA	75
3.1 CONCEPTOS	75
3.2 IMPORTANCIA DE LA RED CARRETERA	75
3.3 RED CARRETERA DE LA REGIÓN DE TEZIUTLÁN	76
3.3.1 Antecedentes	76
3.3.2 Configuración espacial	79
3.3.3 Tramos carreteros y características	79
<i>Autopista Puebla-Teziutlán</i>	82
<i>Carretera Amozoc-Teziutlán</i>	83
<i>Carretera Teziutlán-Nautla</i>	84
<i>Carretera Teziutlán-Perote</i>	85
<i>Carretera Teziutlán-Aire Libre</i>	87
<i>Carretera Aire Libre-Hueyapan-Teteles</i>	87
<i>Hueyapan-Yaonáhuac</i>	88
<i>Entronque Carretera Amozoc-Teziutlán/Yaonáhuac</i>	89
<i>Carretera Amozoc-Teziutlán/ Tlatlauquitepec-Hospital General</i>	90
<i>Entronque Km. 122.5 Autopista Virreyes-Teziutlán/Atempan</i>	90
<i>Ent. Carretera Amozoc-Teziutlán/Tramo alimentador a Autopista Puebla-Teziutlán</i>	91
<i>Entronque Carretera Teziutlán-Nautla/Acateno</i>	92
<i>Carretera Teziutlán-Nautla/ Coyotzingo-Ahuateno</i>	92
<i>Entronque Carretera Teziutlán-Nautla/Ramal a Hueytamalco</i>	93
<i>Libramiento Oriente de Teziutlán</i>	94
<i>Circuito Juan Pablo II</i>	95
<i>Entronque Carretera Amozoc-Teziutlán/Tlatlauquitepec-Mazatepec</i>	95
3.4 SUSCEPTIBILIDAD Y RED CARRETERA: ANÁLISIS ESPACIAL	97
3.4.1 Tramos susceptibles a PRM	99
3.4.2 Análisis y Resultados	113
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES	116
BIBLIOGRAFÍA	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Localización del área de estudio	4
Figura 2: Área de estudio	4
Figura 3: Mapa altimétrico	7
Figura 4: Hidrografía	8
Figura 5: Mapa de climas	9
Figura 1.1: Caída o desprendimiento	12
Figura 1.2: Vuelco o desplome	12
Figura 1.3: Deslizamiento rotacional	13
Figura 1.4: Deslizamiento traslacional	14
Figura 1.5: Flujo	15
Figura 1.6: Expansión lateral	16
Figura 1.7: Movimiento Complejo	17
Figura 1.8: Esquema de factores de inestabilidad	18
Figura 1.9: Deslizamiento ocurrido en abril de 2010 en Taiwán	23
Figura 1.10: Fotografía de la ladera antes del deslizamiento; tomada en 2009	24
Figura 1.11: La Ciudad de Maierato antes de la ocurrencia del deslizamiento de 2010	25
Figura 1.12: La Ciudad de Maierato después de la ocurrencia del deslizamiento de 2010	25
Figura 1.13: Vista aérea del deslizamiento de Maierato, Italia	25
Figura 1.14: Deslizamiento en la Colonia La Aurora en Teziutlán en octubre de 1999	27
Figura 1.15: Imagen del Satélite GOES, el huracán “Stan” impactando al estado de Veracruz	28
Figura 1.16: Trayectoria del Huracán Stan del 1° al 5 de octubre de 2005	30
Figura 1.17: Deslizamiento en Tlahuitoltepec, Oaxaca	32
Figura 1.18: Desprendimiento de rocas y suelo en la Autopista México-Querétaro	32
Figura 2.1: Componentes de un SIG	36
Figura 2.2 La información geográfica proveniente de diversas fuentes	37
Figura 2.3 Formato vectorial y raster	38
Figura 2.4: Tipos de roca	44
Figura 2.5: Tipos de suelo	45
Figura 2.6: Uso del suelo	46
Figura 2.7: Mapa de pendientes	47
Figura 2.8: Mapa de densidad de disección	48
Figura 2.9: Mapa de profundidad de disección	49
Figura 2.10: Mapa de geometría de laderas	50
Figura 2.11: Mapa de orientación de laderas	51
Figura 2.12: Identificación de PRM a través del mosaico de imágenes de satélite Digital Globe	56
Figura 2.13: Procesos de remoción en masa	58
Figura 2.14: Base de datos del inventario de PRM	59
Figura 2.15: Escala base para realizar la comparación de importancia de cada parámetro	60
Figura 2.16: Matriz de pares	60
Figura 2.17: Resultados de encuestas aplicadas a especialistas	62
Figura 2.18: Calculo de peso específico de cada encuesta	63
Figura 2.19: Integración de los resultados de las encuestas para el cálculo del peso específico	63
Figura 2.20: Mapa de susceptibilidad a PRM realizado por Análisis Multicriterio	64
Figura 2.21: Relaciones entre los deslizamientos y los factores utilizados en Pesos de Evidencia ...	66
Figura 2.22: Tabla para el cálculo de Peso Final de cada unidad litológica	67
Figura 2.23: Cálculo del Peso Final de cada clase de la capa de pendientes	68

Figura 2.24: Pesos finales asignados a cada pixel	68
Figura 2.25: Mapa de susceptibilidad a PRM realizado por Pesos de Evidencia	69
Figura 2.26: Comparación del mapeo de susceptibilidad a PRM por Pesos de Evidencia y Análisis Multicriterio	71
Figura 2.27: Número de PRM por rango en el mapa de susceptibilidad realizado mediante el método de Pesos de Evidencia	71
Figura 2.28: Número de PRM por rango en el mapa de susceptibilidad realizado mediante la herramienta del Análisis Multicriterio	71
Figura 2.29: Esquema metodológico para la identificación de zonas susceptibles a PRM	74
Figura 3.1: Deslizamiento en el kilómetro 115 de la Autopista Puebla-Teziutlán	77
Figura 3.2: Clasificación de los Modelos de Estructuración de los asentamientos: Lineal	79
Figura 3.3: Clasificación de los Modelos de Estructuración de los asentamientos: Nucleado	79
Figura 3.4: Clasificación de los Modelos de Estructuración de los asentamientos: Focal	79
Figura 3.5: Administración de la red carretera	80
Figura 3.6: Tramos de la red carretera	81
Figura 3.7: Autopista Puebla-Teziutlán a la altura del municipio de Chignautla, Km.130	82
Figura 3.8: Carretera Amozoc-Teziutlán Km. 148, Sierra Chignautla	83
Figura 3.9: Carretera Amozoc-Teziutlán, Km. 131, zona urbana de Tlatlauquitepec	84
Figura 3.10: Km 13 Carretera Federal Teziutlán-Nautla	85
Figura 3.11: Presencia de humedad en el Km 19 de la carretera Teziutlán-Nautla	85
Figura 3.12: Km. 5 de la Carretera Teziutlán-Perote	86
Figura 3.13: Flujo de transporte en la Carretera Teziutlán-Perote	86
Figura 3.14: Carretera Estatal Teziutlán-Aire Libre	87
Figura 3.15: Tramo Aire Libre-Hueyapan	88
Figura 3.16: Tramo Hueyapan-Teteles	88
Figura 3.17: Carretera Yaonáhuac-Hueyapan	89
Figura 3.18: Carretera a Yaonáhuac	89
Figura 3.19: Libramiento Efrén Ramos Salazar	90
Figura 3.20: Camino municipal de Atempan	91
Figura 3.21: Camino municipal de Zaragoza	91
Figura 3.22: Camino municipal Teziutlán-Acateno	92
Figura 3.23: Vialidad en estado de conservación muy malo	93
Figura 3.24: Las continuas precipitaciones causan daños en las vialidades	93
Figura 3.25: Muros de contención en la carretera a Hueytamalco	94
Figura 3.26: Libramiento Oriente de Teziutlán	94
Figura 3.27: Circuito Juan Pablo II, Teziutlán	95
Figura 3.28: Tramo en buen estado Km. 15	96
Figura 3.29: Tramo en mal estado Km. 5	96
Figura 3.30: Análisis de proximidad	98
Figura 3.31: Superposición de 4 capas de información geográfica	99
Figura 3.32: Susceptibilidad a PRM determinada por el método de Analisis Multicriterio en la red carretera de la Sierra Nororiental	100
Figura 3.33: Susceptibilidad a PRM en la Autopista Puebla-Teziutlán, Tramo Zaragoza-Teziutlán .	101
Figura 3.34: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Amozoc-Teziutlán, Tramo Acuaco Teziutlán	101
Figura 3.35: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Teziutlán-Nautla, Tramo Teziutlán- El Mohón (Límite Puebla -Veracruz)	101

Figura 3.36: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Teziutlán-Perote, Tramo Teziutlán Jalacingo	102
Figura 3.37: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Teziutlán-Aire Libre	102
Figura 3.38: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Aire Libre-Teteles	102
Figura 3.39: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Huayapan-Yaonahuac	103
Figura 3.40: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Amozoc-Teziutlán/ Yaonahuac	103
Figura 3.41: Susceptibilidad a PRM en el Libramiento de Tlatlauquitepec	103
Figura 3.42: Susceptibilidad a PRM en el Tramo alimentador Autopista-Atempan	104
Figura 3.43: Susceptibilidad a PRM en el Tramo alimentador Autopista-Zaragoza	104
Figura 3.44: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Teziutlán-Acateno	104
Figura 3.45: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Teziutlán-Acateno/Entronque Teziutlán-Nautla	105
Figura 3.46: Susceptibilidad a PRM en el Ramal El Mohón-Hueytamalco	105
Figura 3.47: Susceptibilidad a PRM en el Libramiento Oriente de Teziutlán	105
Figura 3.48: Susceptibilidad a PRM en el Circuito Juan Pablo II	106
Figura 3.49: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Amozoc-Teziutlán/Mazatepec, Tramo Tlatlauquitepec- Atotocoyan	106
Figura 3.50: Susceptibilidad a PRM determinada por el método de Pesos de Evidencia en la red carretera de la Sierra Nororiental	107
Figura 3.51: Susceptibilidad a PRM en la Autopista Puebla-Teziutlán, Tramo Zaragoza-Teziutlán .	108
Figura 3.52: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Amozoc-Teziutlán, Tramo Acuaco Teziutlán	108
Figura 3.53: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Teziutlán-Nautla, Tramo Teziutlán- El Mohón (Límite Puebla -Veracruz)	108
Figura 3.54: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Teziutlán-Perote, Tramo Teziutlán Jalacingo	109
Figura 3.55: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Teziutlán-Aire Libre	109
Figura 3.56: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Aire Libre-Teteles	109
Figura 3.57: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Huayapan-Yaonahuac	110
Figura 3.58: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Amozoc-Teziutlán/ Yaonahuac	110
Figura 3.59: Susceptibilidad a PRM en el Libramiento de Tlatlauquitepec	110
Figura 3.60: Susceptibilidad a PRM en el Tramo alimentador Autopista-Atempan	111
Figura 3.61: Susceptibilidad a PRM en el Tramo alimentador Autopista-Zaragoza	111
Figura 3.62: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Teziutlán-Acateno	111
Figura 3.63: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Teziutlán-Acateno/Entronque Teziutlán-Nautla	112
Figura 3.64: Susceptibilidad a PRM en el Ramal El Mohón-Hueytamalco	112
Figura 3.65: Susceptibilidad a PRM en el Libramiento Oriente de Teziutlán	112
Figura 3.66: Susceptibilidad a PRM en el Circuito Juan Pablo II	113
Figura 3.67: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Amozoc-Teziutlán/Mazatepec, Tramo Tlatlauquitepec- Atotocoyan	113
Figura 3.68: Carretera Teziutlán-Perote, Km. 5, Las Coles	115
Figura 3.69: Muro de contención en Km. 4 del Ramal a Hueytamalco	115
Figura 3.70: Proceso de remoción en masa en Atotocoyan	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Clasificación de los procesos de remoción en masa	11
Tabla 1.2: Daños en millones de dólares a diversos sectores en el deslizamiento de La Josefina	22
Tabla 1.3: Daños en millones de pesos ocasionados por el desastre de 1999 en Puebla	27
Tabla 1.4: Daños en millones de pesos ocasionados por el Huracán Stan en 2005 en Puebla	31
Tabla 2.1: Uso de los sistemas de Información Geográfica	34
Tabla 2.2: Capas o cartografía base	38
Tabla 2.3: Cálculo del Índice de recurrencia en Pesos de Evidencia	72
Tabla 2.4: Cálculo del Índice de recurrencia en Análisis Multicriterio	73

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años la prevención de desastres asociados a fenómenos naturales ha cobrado gran importancia, debido al impacto que hay sobre la población y sus bienes. De acuerdo con Maskrey (1993), los fenómenos naturales por su tipo y magnitud, así como por lo sorpresivo de su ocurrencia representan un peligro o amenaza. Entre las diferentes amenazas o peligros naturales destacan las erupciones volcánicas, los sismos, los huracanes, las inundaciones y los procesos de remoción en masa.

En México los procesos de remoción en masa (PRM) son fenómenos que hasta fechas recientes han sido estudiados a detalle. Los desastres asociados a estos procesos han causado grandes pérdidas económicas, especialmente importantes daños a la infraestructura carretera. A pesar de que es difícil precisar los costos que han implicado los daños, en este rubro, se intuye que han alcanzado niveles significativos dentro de la economía nacional (García-Ortega, 2003). Como referencia de lo anterior, en el mes de octubre de 1999, las intensas precipitaciones originaron cientos de PRM en la Sierra Norte de Puebla, en donde los sectores de transporte y comunicaciones fueron los más afectados con el 66.3 % de los daños totales (Bitrán, 2001).

La utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) no se escapa al ámbito de la prevención de desastres (Alcántara-Ayala, 2009). El apoyo de un SIG resulta de gran utilidad para establecer la distribución territorial, hacer evaluaciones y análisis de las amenazas naturales a los que esta expuesta la infraestructura carretera, esto con fines de mitigación y prevención. Además un SIG por sus capacidades de representación gráfica, tiene ventajas en cuestión de organización, actualización y ampliación de la información.

En México se ha desarrollado cartografía apoyada por los SIG con fines de prevención de desastres asociados a PRM, sin embargo, esta ha sido muy generalizada y se ha aplicado de manera insuficiente al territorio nacional. Con el fin de contribuir a dicha temática, esta tesis tiene como finalidad la aplicación de dos metodologías para definir zonas susceptibles a PRM mediante el uso de los SIG. Estas son el análisis multicriterio (Chen *et al.*, 2001) y Pesos Evidencia (Choi y Lee, 2004; Regmi, 2009), Su aplicación permite la generación de cartografía de zonas susceptibles a procesos de remoción en masa de cualquier espacio de la superficie terrestre; en este caso sobre

la red carretera de la región de la Sierra Nororiental de Puebla, misma que de manera indirecta puede ser de gran valor para la prevención y mitigación de desastres.

I. OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Identificar por medio de dos metodologías desarrolladas con el uso de los SIG, la susceptibilidad a procesos de remoción de masa en las principales carreteras de la región de la Sierra Nororiental de Puebla.

OBJETIVOS PARTICULARES

Conocer el estado general de la infraestructura carretera y su importancia en la región.

Determinar los factores físicos y antrópicos que influyen en la ocurrencia de los PRM en la red carretera.

Caracterizar los diferentes tipos de procesos de remoción de masa que ocurren en el área de estudio.

Elaborar un inventario de los procesos de remoción en masa a lo largo de la red carretera del área de estudio.

II. ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis se divide en 4 capítulos, en los cuales se abordan temas significativos para alcanzar los objetivos planteados anteriormente y dar a conocer la importancia y efectos de los PRM sobre la sociedad y sus bienes.

El primer capítulo trata de las características generales de los PRM, tales como conceptos fundamentales, los diversos tipos que existen, los factores que los determinan, los mecanismos que los detonan y su trascendencia para la sociedad y el medio ambiente. También se hace mención de algunos desastres y eventos asociados a PRM que han ocurrido en México y diversas partes del mundo.

En el capítulo 2, se explica la metodología para la obtención de la cartografía de susceptibilidad a PRM en la zona de estudio. La herramienta básica para desarrollar este trabajo fue el SIG *ArcGis 9.3*, complementado por otras herramientas y técnicas tales como: imágenes de satélite, cartografía impresa y digital (datos vectoriales), modelos digitales de elevación (MDE), morfometría, percepción remota, el procesador de imágenes *ENVI 4.7*, un sistema de posicionamiento global (GPS) y trabajo de campo. Además, se desarrollan las metodologías de análisis multicriterio y pesos de evidencia y se hace una comparación de su utilidad.

El análisis y determinación de la susceptibilidad a PRM en la red carretera se abordan en el capítulo 3. Este medio de comunicación indispensable para la vida cotidiana, es estudiado dando a conocer sus características, antecedentes e importancia. Asimismo, se muestran los resultados de dicho análisis a través de mapas que incluyen los tramos carreteros con mayor exposición a PRM.

Finalmente en un último capítulo, se presentan las conclusiones y algunas recomendaciones generales para contribuir a la prevención de desastres.

III. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza al noreste del estado de Puebla, entre los paralelos 19° 45' y 19° 57' de latitud norte, y los meridianos 97° 16' y 97° 35' de longitud oeste; se encuentra en la zona de transición de dos unidades fisiográficas, la Sierra Madre Oriental y el Sistema Volcánico Transversal. Esta zona comprende 10 municipios de los 28 que corresponden a la región de la Sierra Nororiental que anteriormente se denominaba región de Teziutlán (COTEIGEP, 2010). Los municipios son: Zaragoza, Tlatlauquitepec, Yaonáhuac, Atempán, Hueyapan, Teteles de Ávila Castillo, Chignautla, Teziutlán, Xiutetelco y Hueytamalco (Figura 1 y 2). Cabe mencionar que la zona de estudio abarca las áreas más pobladas y las principales vías de comunicación de los municipios de interés.

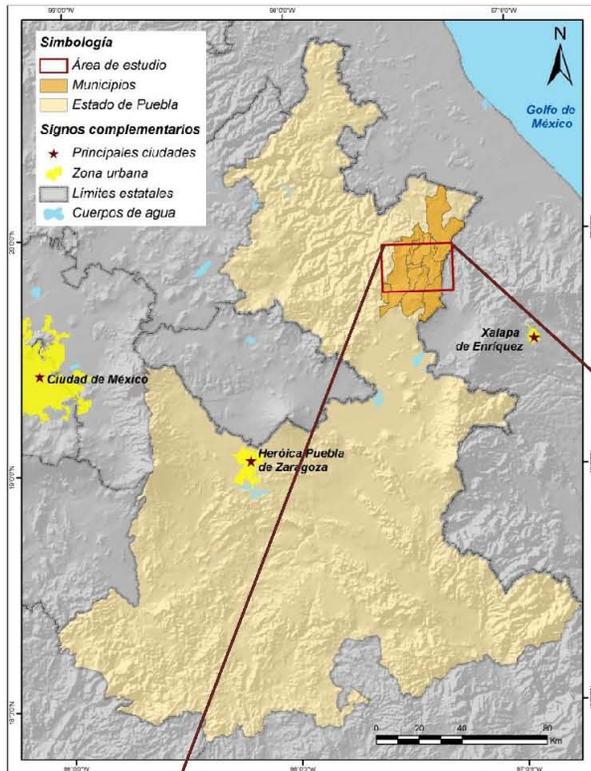
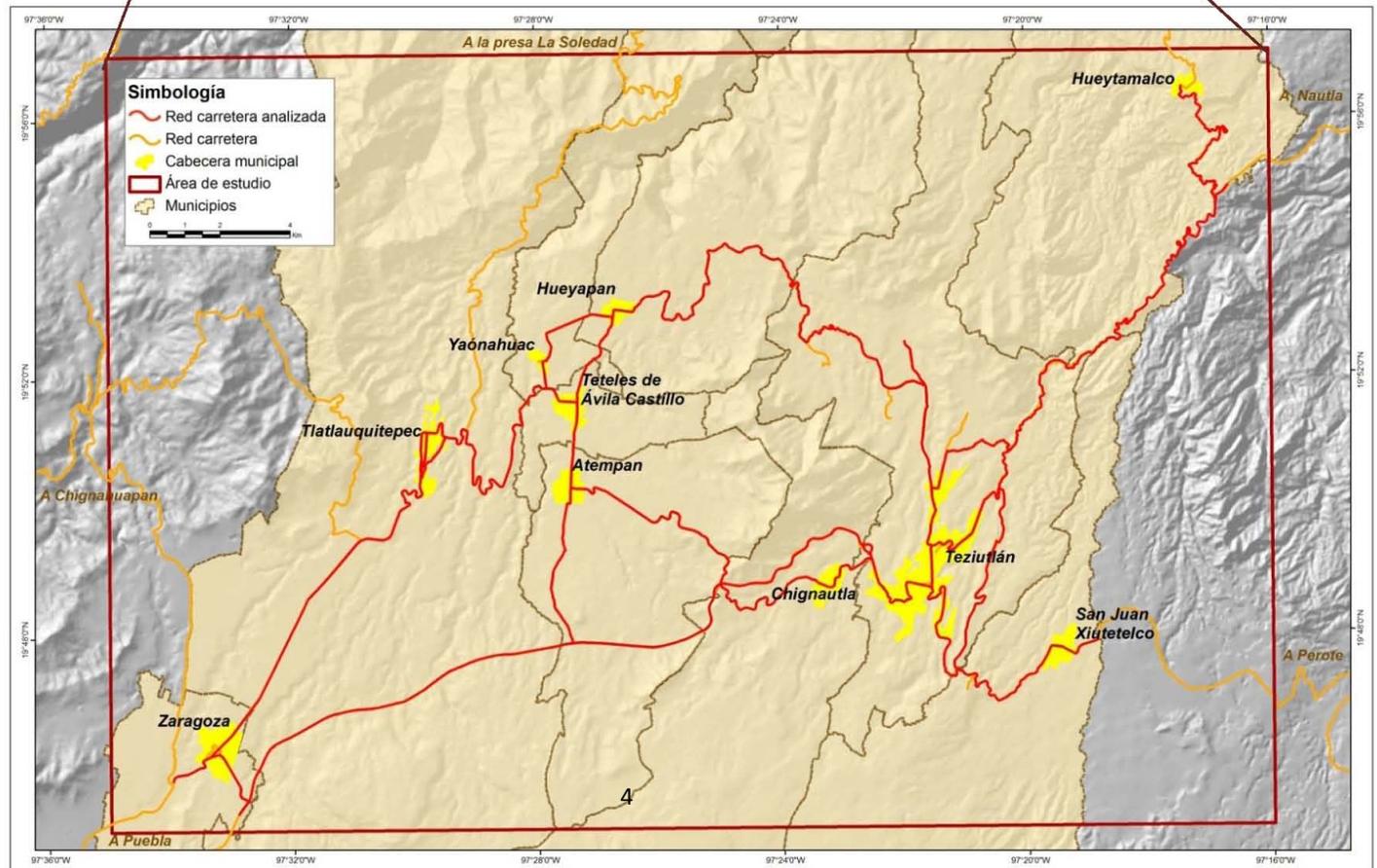


Figura 1: Localización del área de estudio (Fuente: Conjunto de datos vectoriales INEGI, 2010).

Figura 2: Zona de estudio.



El relieve presenta como característica principal un descenso constante de sur a norte, la altitud del área oscila entre los 500 y 2700 metros sobre el nivel del mar (Figura 3). Al sur se encuentran planicies onduladas medianamente diseccionadas, conforme se avanza hacia el norte la disección del terreno va aumentando; en el centro se presentan lomeríos medianamente diseccionados interrumpidos por la Cerro Chignautla (2560 m) al oeste de la ciudad de Teziutlán, y los Cerros Xonocuhuta (2500 m) y las Ánimas (2400 m) al oeste de la ciudad de Tlatlauquitepec; y en el norte del área de estudio se localizan sierras fuertemente diseccionadas.¹

La geología del lugar es muy diversa debido a que se encuentra en la zona de transición de dos provincias fisiográficas. El basamento está conformado por rocas metamórficas de esquisto y metalava del Pérmico Inferior que afloran en la porción norte del área; discordantemente, está cubierto por rocas jurásicas constituidas por una alternancia de lutita y arenisca con nódulos de caliza y horizontes de conglomerado polimíctico. Le sobreyace de forma concordante y transicional formaciones de caliza y lutita que afloran en la parte noroeste. Sobreyaciendo discordantemente a la secuencia sedimentaria, se encuentran los depósitos provenientes del campo volcánico de Los Humeros, ampliamente expuestos en la porción noreste, constituidos por andesita y andesita basáltica del Plioceno. Cubriendo las unidades anteriores discordantemente en la porción sur y centro se encuentra toba riolítica del Plioceno tardío y Pleistoceno temprano. En los sectores sur y suroriental se deposita pumicita la cual pertenece al Pleistoceno. Finalmente la actividad volcánica culmina con un derrame de basalto de olivino localizado en la porción suroriental pertenecientes también al Plioceno (SGM, 2011).

La zona de estudio se encuentra dentro de la Regiones Hidrográficas 27A y 27B, la primera correspondiente al Río Nautla y la segunda al Río Tecolutla (INEGI 2011). La configuración de la red fluvial es de tipo paralelo con dirección suroeste-noreste, entre los principales ríos destacan el Acongo, Ocotlán, Xochihuatزالoyan, Maquina Vieja, Xucayucan y Xoloatl, los cuales desembocan en el Río Tecolutla, también destacan los ríos El Calvario, Jalacingo y Tezayacapa que son afluentes del Río Nautla (Figura 4).

¹ Interpretación de las Cartas Topográficas: Hojas Teziutlán y Altotonga escala 1:50 000.

La zona presenta 3 tipos de clima, En la parte más alta al suroeste es templado subhúmedo, el templado húmedo tiene presencia en la zona al sur y centro donde se localizan la mayoría de las cabeceras municipales y el semicálido húmedo en las partes más bajas al norte. La temperatura media anual en las partes altas es de 14°C, mientras que en la parte más baja es de 20°C, siendo mayo el mes más cálido y enero el más frío. La precipitación total anual es de entre los 1000 y 3500 mm, en donde el mes más seco es marzo y el que presenta mayor precipitación es septiembre (Figura 5).

De acuerdo con la clasificación de la FAO UNESCO (IUSS,2007) el tipo de suelo que predomina es el andosol ócrico en la porción noreste y el andosol húmico en la porción suroeste; estos suelos de origen volcánico, están constituidos principalmente de ceniza, la cual contiene un alto contenido de alófono, que le confiere ligereza y untuosidad al suelo, además estos suelos de color oscuro tienen alta capacidad de retención de humedad y son muy susceptibles a la erosión. Tienen bajos rendimientos agrícolas debido a que retienen considerablemente el fósforo, y el uso más favorable para su conservación es el forestal (INEGI, 2004).

El tipo de vegetación es muy variado, en la zona norte en donde hay presencia de fuertes pendientes, se encuentran bosques mesófilos de montaña que han sido afectados por actividades antrópicas en las que destacan la inducción de cultivos y pastizales; en las elevaciones de la zona centro y sur se localizan bosques de pino, de pino-encino y encino-pino; en las zonas planas de toda el área de estudio hay presencia de zonas agrícolas de temporal acompañadas con pastizales cultivados en la zona oriente.²

² Interpretación de imágenes de satélite SPOT, 2011 y del Conjunto de datos vectoriales de la serie topográfica y de recursos naturales escala. 1:1 000 000, INEGI, 2012.

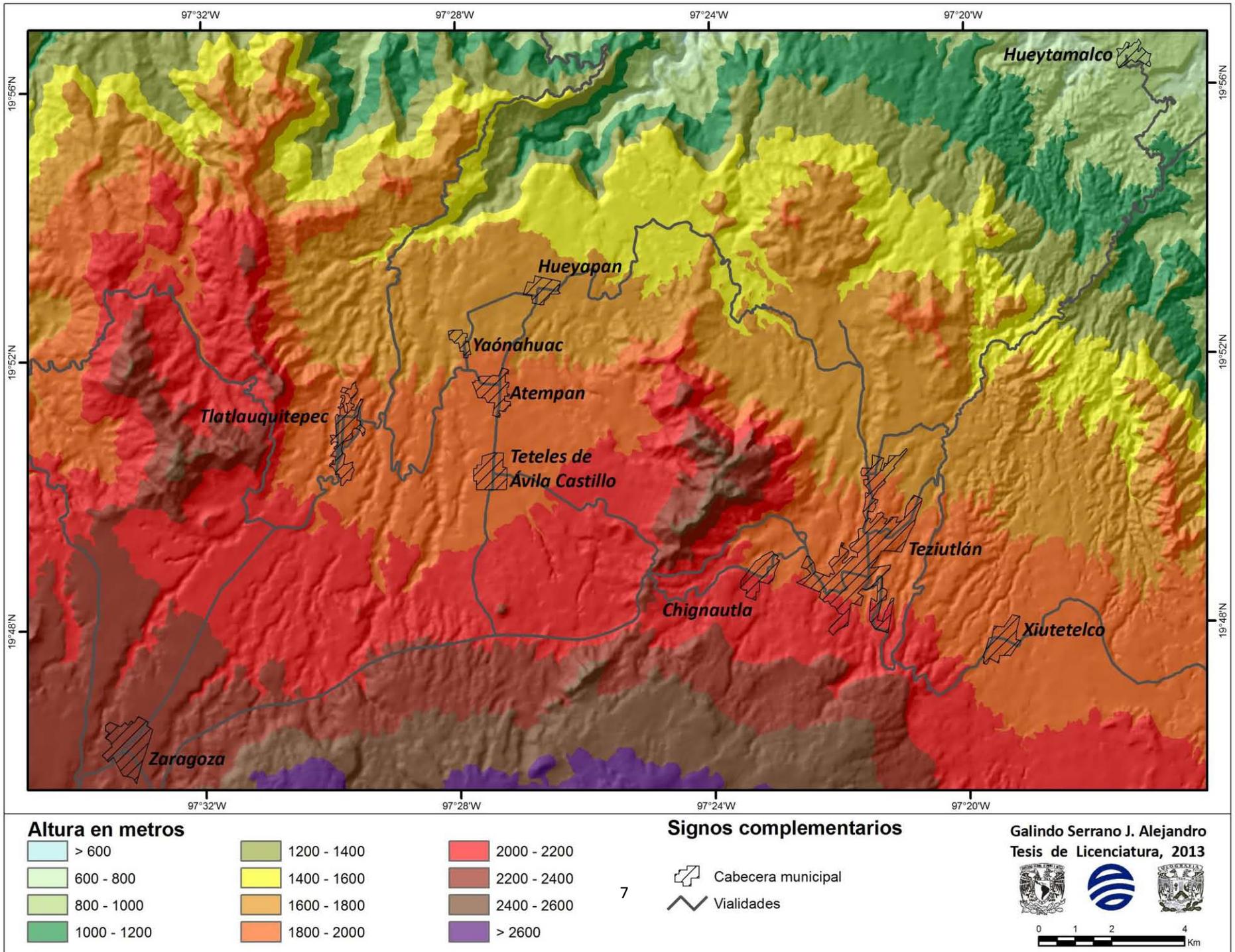


Figura 3: Mapa altimétrico.

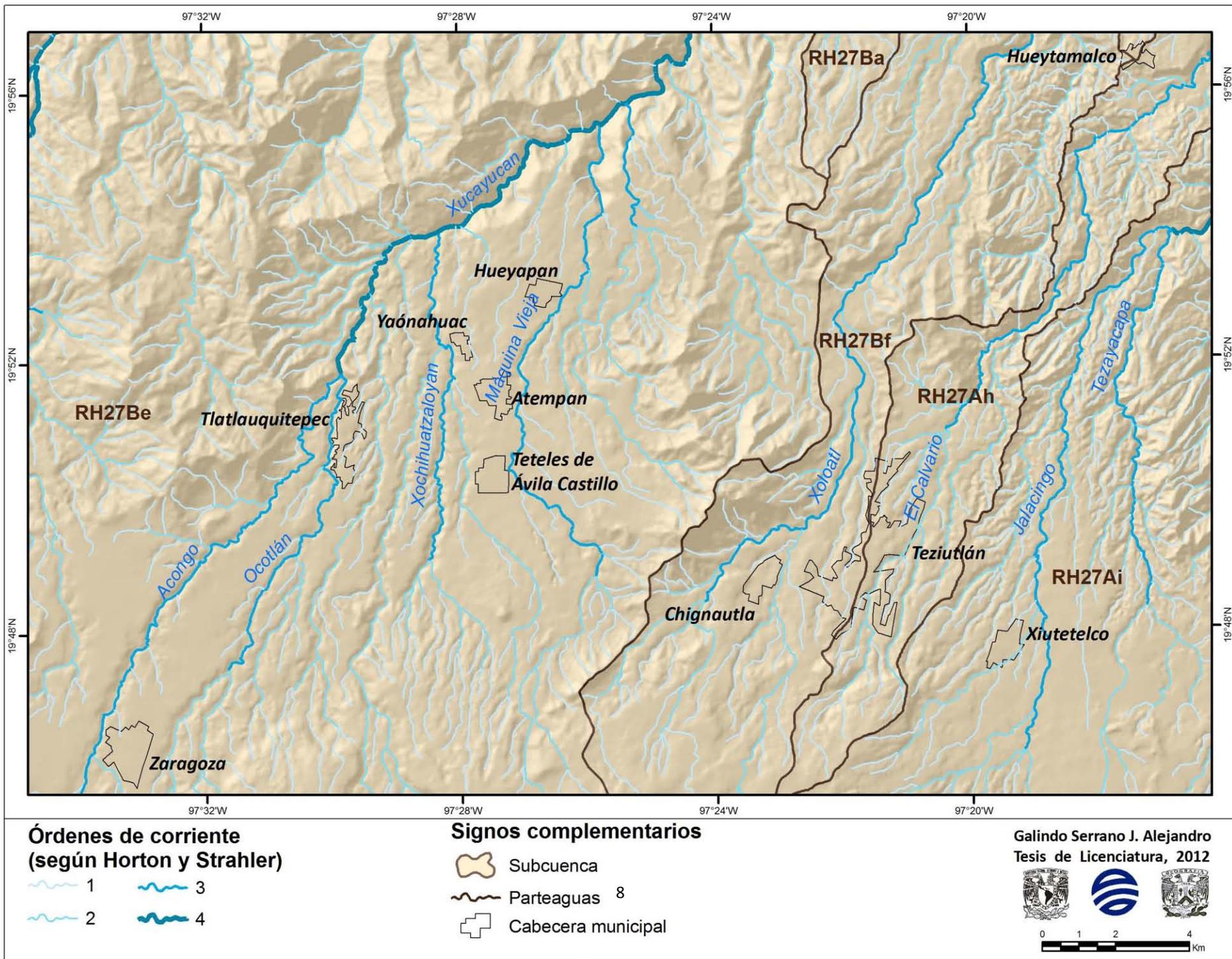


Figura 4: Hidrografía.

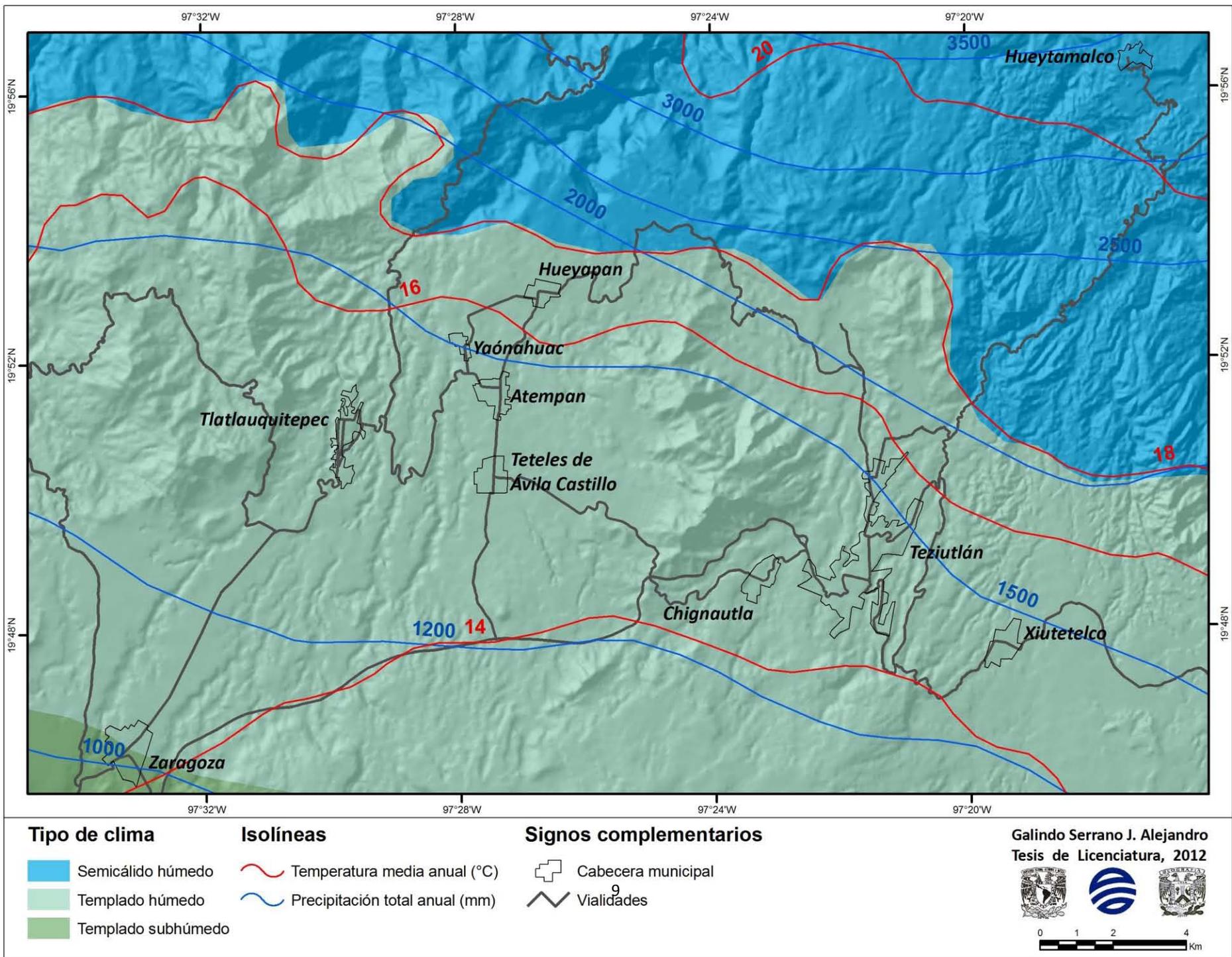


Figura 5: Mapa de climas.

CAPÍTULO 1. PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA (PRM).

1.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES.

Los procesos de remoción en masa (PRM) comúnmente conocidos como deslaves o derrumbes, son fenómenos naturales que ocurren principalmente en laderas con una fuerte pendiente. Existen diversos términos que se emplean para referirse a un PRM, términos tales como “procesos de ladera”, “procesos gravitacionales” y “movimientos de ladera” se utilizan como sinónimos para referirse a un PRM (Alcántara-Ayala, 2000).

A pesar de existir diversas definiciones que han ido evolucionando como resultado de la incorporación de los aportes de diferentes autores (Penk, 1894; Sharpe, 1938; Terzaghi, 1950; Varnes, 1958; Skempton y Hutchinson, 1972; Coates, 1977; Brunsden, 1979), todas coinciden en que un PRM es un movimiento hacia abajo de los materiales que forman una ladera, y este es influenciado directamente por la gravedad.

De acuerdo con Brunsden (1979), un PRM se define como “aquellos movimientos de los materiales formadores de las laderas bajo la influencia de la gravedad y sin la asistencia primordial de algún agente de transporte fluido como el agua, el aire o el hielo”.

Por otra parte De Pedraza (1996), define un PRM como: “...el desplazamiento de materiales en las vertientes, sin intervenir ningún soporte activo o medio para movilizarlos, es decir, impulsados por su propio peso; corresponde por lo tanto, a una “autotraslación” bajo la acción directa de la gravedad...”.

El Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, 2008), indica que un PRM es un término general que se utiliza para describir el movimiento de rocas, tierra y materiales orgánicos pendiente abajo, bajo los efectos de la gravedad y también es la forma de relieve resultante de esos movimientos.

1.2 TIPOLOGÍA.

La clasificación de procesos de remoción en masa más utilizada y aplicada a nivel mundial fue propuesta por el Programa EPOCH (1993), la cual se basa en el tipo de movimiento (Varnes, 1978) y el tipo de material involucrado (Hutchinson, 1988). De acuerdo con esta clasificación los tipos de movimiento son caídas o desprendimientos, vuelcos o desplomes, expansiones laterales, flujos, deslizamientos, y movimientos complejos; asimismo, estos se subdividen de acuerdo con el tipo

de material que lo conforman, los cuales son rocas, suelos y derrubios o detritos (Tabla 1.1) (Alcántara-Ayala, 2000).

Tabla 1.1: Clasificación de los procesos de remoción en masa, EPOCH (1993) a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988).

MECANISMO DE MOVIMIENTO		TIPO DE MATERIAL INVOLUCRADO		
Tipo	Roca	Derrubios	Suelo	
Desprendimiento	Caída o desprendimiento de rocas	Caída o desprendimiento de derrubios	Caída o desprendimiento de suelos	
Vuelco o desplome	Vuelco o desplome de rocas	Vuelco o desplome de derrubios	Vuelco o desplome de suelos	
Deslizamiento rotacional	Individual, múltiple o sucesivo	Individual, múltiple o sucesivo	Individual, múltiple o sucesivo	
Deslizamiento traslacional	Deslizamiento de roca en bloque	Deslizamiento de derrubios en bloque	Deslizamiento traslacional de suelos	
Deslizamiento planar	Deslizamiento de rocas	Deslizamiento de derrubios	Coladas de barro	
Flujo	Flujo de rocas	Corrientes de derrubios	Flujos de tierra, arena o suelo	
Expansión lateral	Expansiones laterales en rocas	Expansiones laterales en derrubios	Expansiones laterales en suelos	
Complejo	Ejemplo: Alud de rocas	Ejemplo: Flujo deslizante	Ejemplo: Rotación con flujo de tierras	

Fuente: Alcántara-Ayala (2000)

1.2.1 Caídas o desprendimientos

Las caídas o desprendimientos (Figura 1.1) son movimientos bruscos de materiales tales como rocas, detritos o suelos que se desprenden de acantilados costeros, orillas escarpadas de un río, bordes de mesetas, escarpes y laderas con una fuerte inclinación, estas laderas son tanto del tipo natural como del tipo artificial. La separación de los materiales se produce a lo largo de discontinuidades tales como fallas o planos de estratificación, por lo que el movimiento se da en caída libre y el material tiende a rodar, rebotar, deslizarse y fluir ladera abajo. La velocidad de estos movimientos es extremadamente rápida y son fuertemente influenciadas por la gravedad, la meteorización mecánica y la presencia de agua en fisuras o grietas (Alcántara-Ayala *et al.*, 2001).

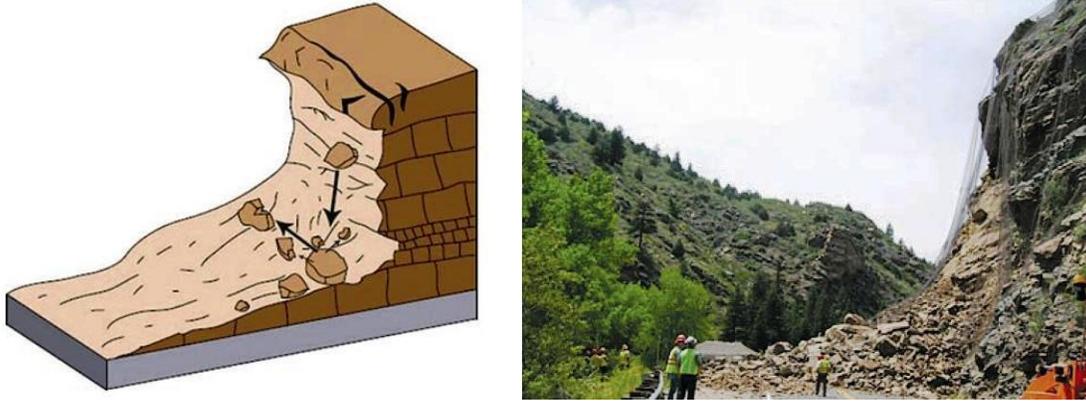


Figura 1.1: Caída o desprendimiento (Fuente: USGS 2008).

1.2.2 Vuelcos o desplomes

El vuelco o desplome (Figura 1.2) es un movimiento semejante a una caída o desprendimiento. Este consiste en una acción de rotación o giro de los materiales en torno a un eje determinado por su centro de gravedad y no se da una separación completa. El movimiento involucra grandes masas de material que se rompen y se separan paralelos a la pared escarpada; asimismo el movimiento se da hacia adelante o hacia la parte externa por lo cual se presenta inclinación o basculamiento y no hay colapso (Alcántara-Ayala *et al.*, 2001).

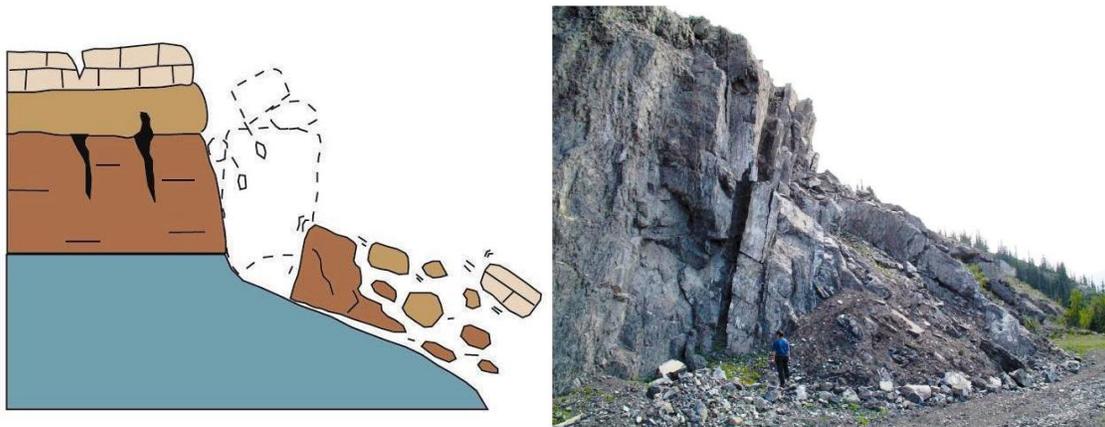


Figura 1.2: Vuelco o desplome (Fuente: USGS 2008).

1.2.3 Deslizamientos

Los deslizamientos son movimientos ladera abajo de masas de roca, suelos o detritos que ocurren sobre una superficie de ruptura. Debido a la complejidad de estos, se han dividido de acuerdo con su superficie de ruptura. De esta forma se incluyen los deslizamientos rotacionales, los traslacionales y los planos.

Los deslizamientos rotacionales (Figura 1.3) son aquellos que presentan una superficie de ruptura en forma semicircular y cóncava, los bloques de materiales superiores presentan una inclinación hacia atrás, el escarpe principal frecuentemente es vertical, el material se deposita dadera abajo y su deformación interna es muy baja. Posteriormente se puede dar un retroceso progresivo de la corona. La velocidad y extensión de este tipo de movimiento es muy variable.

Los deslizamientos traslacionales (Figura 1.4) ocurren sobre una superficie de ruptura ondulada o semiplana, son menos profundos que los rotacionales e involucran un movimiento paralelo a la superficie; regularmente están controlados por superficies de debilidad de los materiales formadores.

Los deslizamientos planos son aquellos en donde la superficie de ruptura es plana y al igual que los traslacionales, tienen un movimiento paralelo a la superficie (Alcántara-Ayala *et al.*, 2001).

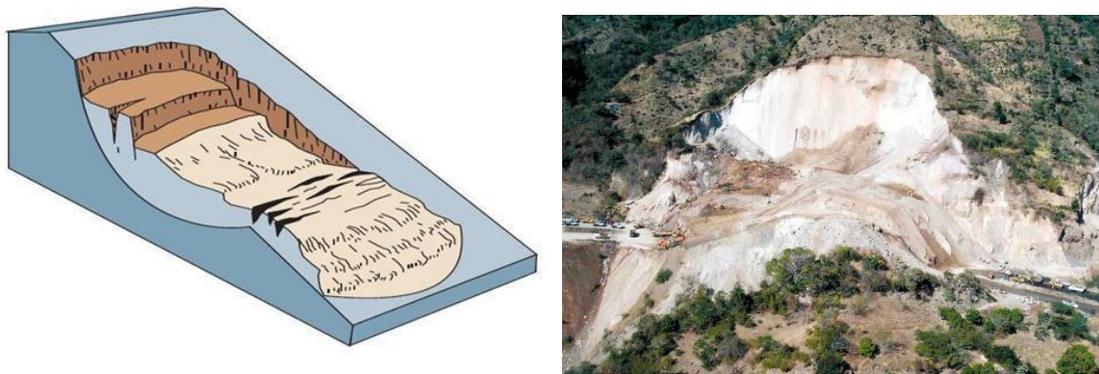


Figura 1.3: Deslizamiento rotacional (Fuente: USGS 2008).



Figura 1.4: Deslizamiento traslacional (Fuente: USGS 2008).

1.2.4 Flujos

Un flujo (Figura 1.5) es un movimiento espacialmente continuo en donde el material involucrado se comporta como un fluido viscoso, en donde el agua y el aire están involucrados; las superficies de corte son muy próximas entre sí y no suelen conservarse, por lo tanto son muy difíciles de observar. El desplazamiento es muy variado y puede ser rápido o lento, así como secos o húmedos, además la distribución de velocidades dentro del flujo no es homogénea y origina la formación de lóbulos (Alcántara-Ayala *et al.*, 2001).

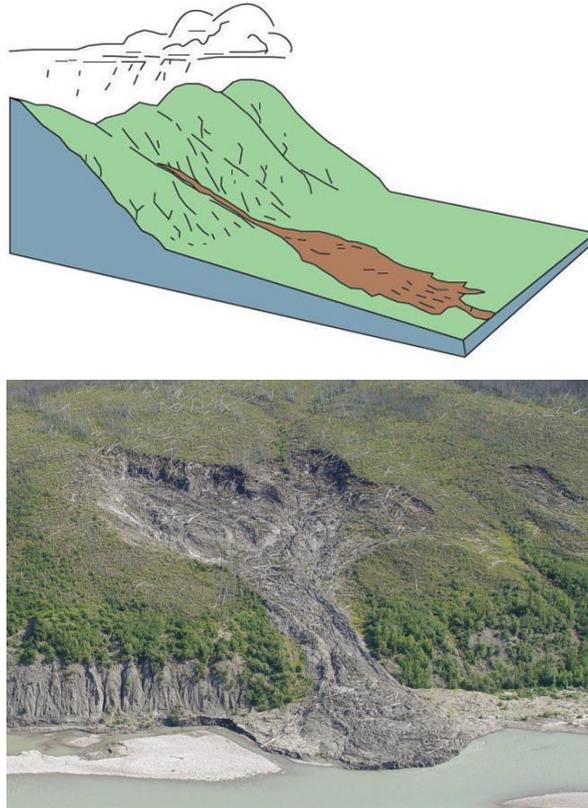


Figura 1.5: Flujo (Fuente: USGS 2008).

1.2.5 Expansiones laterales

Las expansiones laterales (Figura 1.6) son movimientos que se originan en laderas de baja inclinación y son causados por la fracturación y expansión de suelos o masas de rocas compactas, esto es debido a que los materiales sueltos y saturados con alto contenido de arena y limo obtienen el comportamiento de un fluido causado por vibraciones y los fragmentos de materiales gruesos esta inmersos en una matriz de materiales más finos que contienen arcillas. Estos movimientos ocurren principalmente en ambientes lacustres y marinos de poca profundidad (Alcántara-Ayala *et al.*, 2001).

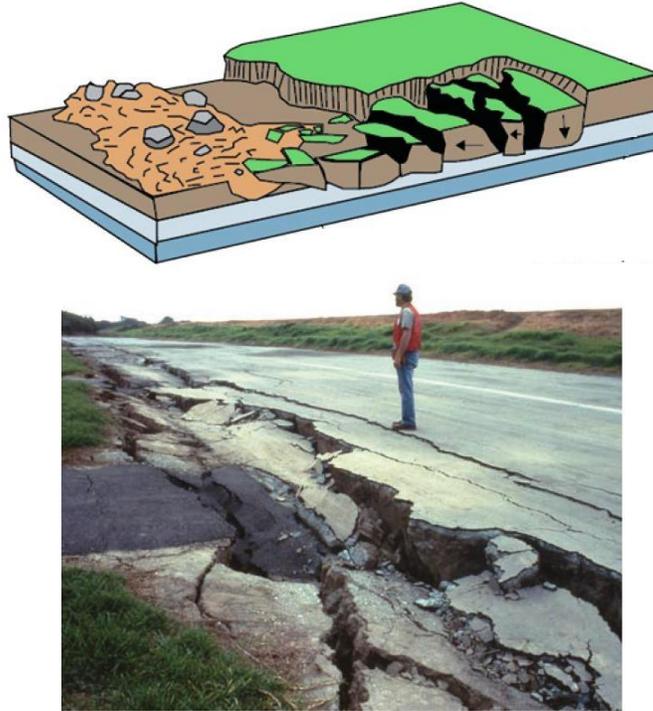


Figura 1.6: Expansión lateral (Fuente: USGS 2008).

1.2.6 Movimientos complejos

El movimiento complejo es aquel que inicia de una forma determinada y se transforma en otro tipo de movimiento al desplazarse ladera abajo, es decir, que es la combinación de dos o más de los procesos mencionados anteriormente. Entre los movimientos complejos más comunes se consideran a las avalanchas de rocas (Figura 1.7) y los flujos deslizantes. Estos dos tipos de movimiento son originados por el colapso repentino y de gran extensión de una masa de material granular que viaja a grandes velocidades como consecuencia de un evento perturbador (Alcántara-Ayala *et al.*, 2001).

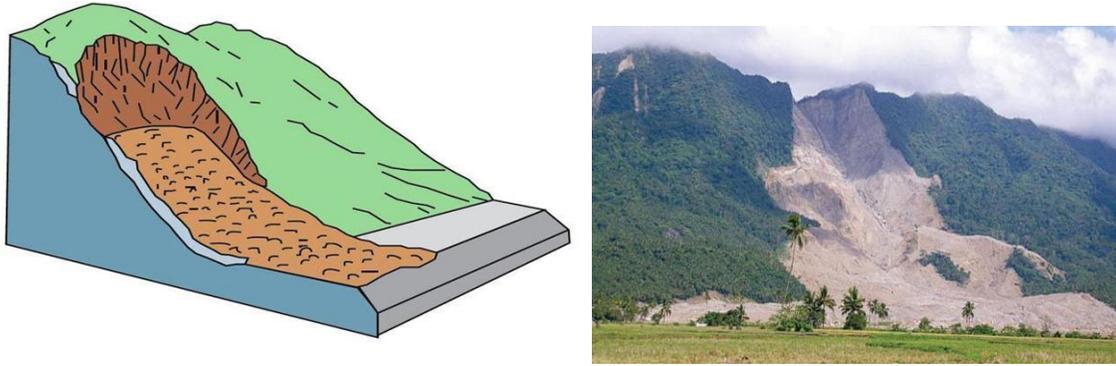


Figura 1.7: Movimiento Complejo (Fuente: USGS 2008).

1.3 FACTORES DETERMINANTES DE LA INESTABILIDAD DE LADERAS.

Existen diversos factores que intervienen en la inestabilidad de laderas y son la causa de que se origine algún proceso de remoción en masa. Estos factores se dividen en internos y externos (Terzaghi, 1950).

Los factores externos son aquellos que ocasionan un incremento en los esfuerzos o acciones que se dan en una ladera, es decir, producen una mayor concentración de las fuerzas motoras o actuantes (Alcántara-Ayala *et al.*, 2001). De acuerdo con Brusden (1979) los procesos externos más importantes son los siguientes:

1. Los que están relacionados con el cambio de la forma o geometría de la ladera, tales como la erosión, la socavación y las excavaciones artificiales que ocasionan cambios en la longitud e inclinación de la pendiente.
2. Los que ocasionan un aumento de carga en una ladera como la agregación de material, el incremento del peso por construcciones, la urbanización y recargas de agua con ausencia de drenaje.
3. La descarga de materiales por medio de erosión, incisión, la deforestación y excavaciones artificiales.
4. Los que causan vibraciones, ya sea naturales como artificiales, por ejemplo los sismos y el uso de maquinaria pesada; en esta parte se asocian procesos como la licuefacción, remodelación, lubricación del aire y flujo de granos cohesivos.
5. Cambios en los regímenes hidrológicos, principalmente en las precipitaciones y el aumento de peso y presión de los poros.

Los factores internos reducen la resistencia de los materiales, es decir disminuyen la concentración de las fuerzas resistentes; por otra parte estos factores están relacionados con las características de los materiales, ya sea en su composición, textura, grado de intemperismo, características físico-químicas y las modificaciones que estos van presentando (Alcántara-Ayala *et al.*, 2001). A continuación se señalan algunos factores internos (Brusden, 1979):

1. La presencia de fallas continuas, expansiones laterales, fisuras y erosión.
2. Procesos de intemperismo, congelación, descongelación, desecación y la reducción de la cohesión.
3. Filtración y presencia de tuberías.

En la figura 1.8 se observa la relación que hay entre las fuerzas actuantes y las fuerzas resistentes que mantiene en equilibrio a una ladera. Si las fuerzas resistentes son mayores a las actuantes la ladera permanecerá estable; y cuando las fuerzas actuantes superan a las resistentes la ladera se vuelve inestable.



Figura 1.8: Esquema de factores de inestabilidad (Fuente: Alcántara-Ayala *et al.*, 2001)

1.4 MECANISMOS DETONANTES.

Los procesos de remoción en masa son activados por la ocurrencia de diversos fenómenos físicos y antrópicos, éstos son enlistados a continuación:

A) Los **fenómenos hidrometeorológicos** son los principales mecanismos detonadores, ya que estos causan intensas precipitaciones y de larga duración. La lluvia que se infiltra en el suelo de una ladera, reduce la resistencia de los materiales por medio de la presión de los poros al acumularse el agua, y aumenta el peso y volumen de los mismos. Asimismo, por otra parte las intensas lluvias pueden causar erosión y socavación que pueden alterar la geometría del relieve.

B) La **actividad sísmica** es el segundo mecanismo detonador, ya que la energía de las ondas sísmicas provoca movimientos de terreno tales como los desprendimientos, los deslizamientos y las expansiones laterales por efecto de la licuefacción.

C) La **actividad volcánica** puede originar también lahares o flujos de lodo y avalanchas de detritos en las laderas volcánicas.

D) La **actividad antrópica** también ha agravado e incrementado la inestabilidad de laderas; actividades como la deforestación, la construcción de viviendas e infraestructura que alteran la geometría del relieve y la actividad minera pueden alterar el equilibrio de las laderas de forma considerable.

1.5 SIGNIFICADO DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA

El conocimiento de los procesos de remoción es de gran relevancia porque además de los impactos que causan a nivel local y regional en cuanto a la pérdida de vidas y pérdidas económicas directas, actualmente, también tiene implicaciones globales relacionadas con el Tratado de Libre Comercio (TLC) y el Cambio Climático Global (CCG) (Garza *et al.*, 2001).

El primer caso se refiere a las demandas del TLC en cuanto a las condiciones de seguridad que deben tener los sistemas viales por los cuales transitan los vehículos que transportan productos de diversa índole por todo el país. En este caso, es evidente la ocurrencia de procesos de remoción en masa a lo largo de las carreteras. Esto puede estar relacionado con la calidad de los materiales empleados, la construcción o la falta de estudios geomorfológicos y geológicos detallados que permitan conocer la dinámica de los materiales formadores del relieve, sobre todo en terrenos montañosos.

En cuanto al CCG, se tiene la preocupación de que este tipo de fenómenos naturales se incrementen si la tendencia climática va en aumento con la frecuencia e intensidad de las lluvias. Lo anterior constituye una amenaza para las poblaciones que están asentadas en laderas inestables, ya que existe la posibilidad de que los cambios ambientales globales reactiven estos procesos y causen problemas.

1.6 DESASTRES ASOCIADOS A PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA.

1.6.1 Concepto de desastre.

Como ya se mencionó al inicio de este capítulo, los PRM son fenómenos que ocurren comúnmente en la naturaleza. Sin embargo, durante las últimas décadas el considerable incremento de la población y demanda de infraestructura para bienes y servicios, ha ocasionado la ocupación de terrenos inestables, por lo que los PRM se han convertido en una amenaza. En diversas partes del mundo han ocurrido considerables pérdidas humanas, materiales y económicas debido a los desastres y como consecuencia de la materialización de condiciones de riesgo, este último derivado de la combinación de poblaciones vulnerables y la existencia de amenazas, tales como los PRM.

Un desastre se define como una seria interrupción en el funcionamiento de una comunidad o sociedad que ocasiona en la vida humana, pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de la comunidad o la sociedad afectada para hacer frente a la situación mediante el uso de sus propios recursos (UNISDR, 2009).

1.6.2 Desastres y eventos asociados a PRM a nivel mundial.

En este apartado se hace mención a algunos casos de desastres y eventos asociados a PRM que han ocurrido en diversas partes del mundo, en los cuales se registraron cuantiosas pérdidas de vidas humanas y económicas y en particular considerables daños en el sector de comunicaciones y transporte.

El alud en la cuenca del Río Limón, Venezuela

El 6 de septiembre de 1987 en la cuenca del Río el Limón localizada al norte de la ciudad de Maracay, una precipitación de 180 mm en menos de 6 horas desencadenó diversos procesos de remoción en masa. Los movimientos que se presentaron fueron avalanchas de derrubios (escombros), deslizamientos de derrubios (colapsos de escombros), flujos torrenciales de ladera (flujos de derrubios), y deslizamientos rotacionales (Audemard y Singer, 2002).

Las convergencias de varias avalanchas de suelo, rocas y troncos de árboles provocadas por la denudación ocurrida en laderas boscosas cubiertas de suelos residuales granulares con pendiente elevada y marcado control estructural originó este alud, hubo una gran capacidad de arrastre y de expansión del mismo en la planicie aluvial del Río Limón (*Ibid*).

Uno de los mayores daños causados por este evento fue a lo largo de la carretera El Limón - Ocumare de la Costa, a consecuencia de la obstrucción de todas las obras ingenieriles de drenado por la gran cantidad de material acarreado. El proceso de ladera dejó volúmenes considerables de lodo, bloques de roca y troncos de árboles, en algunos tramos logro socavar el asfalto de la vialidad por efecto de la caída en forma de cascada (*Ibid*).

Los daños materiales no se restringieron a la misma vialidad, en la población del Limón, los flujos de lodo arrasaron con varias viviendas que se encontraban en los márgenes del río, se perdieron centenares de vehículos y también hubo pérdidas de vida que lamentar. De acuerdo con informes de la OEA (1991) hubo 96 muertos y aproximadamente 600 damnificados.

La catástrofe del deslizamiento de La Josefina, Ecuador

El 29 de marzo de 1993 en la provincia de Azuay en Ecuador, un deslizamiento de aproximadamente 25 millones metros cúbicos de roca y suelo bloqueó el cauce del Río Paute originando una presa de 100 metros de alto y un kilómetro de longitud, formando un lago de 200 millones metros cúbicos de agua. Posterior al evento, se realizaron excavaciones para formar un canal de 18 metros de altura y 6 metros de ancho con el fin de disminuir el nivel del agua y las inundaciones aguas arriba; sin embargo, 26 días después se desbordó el canal y 33 días más tarde la presa se rompió por causa de la erosión superficial provocando una onda de crecida de más de

10 000 metros cúbicos, lo que produjo severos daños aguas abajo. El descenso brusco de agua del embalse y el flujo de la misma provocaron numerosos deslizamientos menores (Zevallos, 1994).

La interrupción entre varias poblaciones importantes a causa de los daños y bloqueos de la carretera Panamericana generó una verdadera emergencia vial que desquició la economía y la movilidad de la población, por lo que se habilitaron caminos de tercer orden para el tráfico de la emergencia (*Ibid*).

Las pérdidas de este desastre fueron considerables (Tabla 1.2). Oficialmente hubo 35 personas fallecidas y 6,420 damnificadas, 716 viviendas afectadas, de las cuales el 70% fueron completamente destruidas, se afectaron campos de cultivo, infraestructura industrial y hubo un total de 40 Km de vialidades dañadas (*Ibid*).

Tabla 1.2: Daños en millones de dólares a diversos sectores en el deslizamiento de La Josefina. Fuente: (Zevallos, 1994)

Sectores	Daños en millones de dolares
Vivienda	7.13
Agropecuario	22.17
Industria	8.83
Infraestructura vial y de comunicaciones	73.56
Infraestructura social (escuelas, iglesias, mercados)	0.69

Deslizamiento en la Autopista Núm. 3 de Taiwán

La Isla de Taiwán con una extensión de 36 000 kilómetros cuadrados, tiene más de dos terceras partes de territorio montañoso. Taiwán cuenta con una amplia red de caminos de más de 67 000 kilómetros, algunos otros construidos con altas normas de ingeniería, pero otros fueron construidos sin normas adecuadas. Varias de estas vialidades fueron construidas a lo largo de los valles fluviales con métodos de corte de pendientes; por lo tanto es frecuente la ocurrencia de PRM a lo largo de las mismas y especialmente durante largos periodos de lluvias o lluvias torrenciales ocasionadas por lo tifones (Ching J. y Liao H., 2006).

El 25 de abril de 2010, después de varios días de precipitación, ocurrió un deslizamiento con un volumen de material equivalente a dos estadios de fútbol (News 24, 26/04/2010), es decir, se

estimaron 200, 000 metros cúbicos de material. Este fenómeno afectó todo un tramo de la Autopista Nacional Número 3 en el noreste de la Ciudad de Taipéi (Figura 1.9); las pérdidas que causó este evento fueron tres vehículos, cuatro personas que quedaron sepultadas y la destrucción de un puente (Petley, 2010).



Figura 1.9: Deslizamiento ocurrido en abril de 2010 en Taiwán. Fuente: (www.landslideblog.org)

De acuerdo con Petley (2010), la ladera donde ocurrió el PRM era un corte escalonado en donde estaban presentes unas anclas estabilizadoras (Figura 1.10); la geometría de la ladera causó que se formara un plano de debilidad sub paralelo a la superficie de la pendiente y permitió que los materiales conformados por una alternancia de caliza con lutitas y areniscas se deslizaran.



Figura 1.10: Fotografía de la ladera antes del deslizamiento; tomada en 2009 (Fuente: Google Earth 2012).

El deslizamiento de Maierato, Italia

El 15 de febrero de 2010, al oeste de la ciudad de Maierato, localizada en el sur de Italia ocurrió un deslizamiento de grandes dimensiones al (Figura 1.11 y 1.12); este evento fue desencadenado por las intensas precipitaciones en suelos altamente erosionables, heterogéneos con intercalaciones de estratos de arcillas, limo y areniscas (Jaithish, 2010).

Posterior a la ocurrencia del deslizamiento, se evacuaron a 2 300 personas y no hubo pérdida de vidas; sin embargo, dos vialidades principales fueron destruidas completamente en sus respectivos tramos (Figura 1.13). Este PRM ha sido una de los más importantes en el mundo debido a sus dimensiones y porque actualmente es un fenómeno que continúa activo por lo que existen señalizaciones sobre la carretera que indican donde hay movimiento de terreno.



Figura 1.11: La Ciudad de Maierato antes de la ocurrencia del deslizamiento de febrero de 2010. (Fuente: NASA, 2012)



Figura 1.12: La Ciudad de Maierato después de la ocurrencia del deslizamiento de febrero de 2010. (Fuente: NASA, 2012)



Figura 1.13: Vista aérea del deslizamiento de Maierato, Italia. (Fuente: Jaithish, 2010)

1.6.3 Desastres y eventos asociados a PRM en México

El desastre de 1999 en la Sierra Norte de Puebla

Durante los primeros días del mes de octubre de 1999 se registraron lluvias torrenciales ocasionadas por la confluencia de varios sistemas atmosféricos que afectaron particularmente la Sierra Norte del Estado de Puebla. El principal fenómeno que se presentó fue la depresión tropical Núm. 11, que posteriormente entró en contacto con el frente frío número 5; éstos fenómenos se desplazaron hacia el NE donde chocaron con flujos de aire húmedo provenientes del mismo Golfo de México, por lo que se generó una gran cantidad de vapor de agua que finalmente ocasionó fuertes lluvias en los estados de Puebla, Hidalgo y Veracruz, lo que desencadenó la ocurrencia de cientos de procesos de remoción en masa (Alcántara-Ayala *et al.*, 2001; Bitrán, 2001).

En el caso de Puebla, los daños fueron cuantiosos y afectaron una amplia zona del estado, la cual se caracteriza por tener altos niveles de marginación en el país y en la que predomina la agricultura de autoconsumo. Una considerable parte de la población es vulnerable desde el punto de vista socioeconómico y está expuesta a diversas amenazas.

Los sectores que presentaron los mayores daños fueron la infraestructura y servicios con dos tercios de las pérdidas totales (Tabla 1.3); en este sector destacan los daños que ocurrieron en el sistema de comunicaciones y transportes. Dicho evento ocasionó la pérdida de 263 vidas, de las cuales más de 100 ocurrieron en la Colonia la Aurora en el municipio de Teziutlán (Figura 1.14). Los daños se extendieron a 81 municipios debido al desbordamiento de ríos, procesos de ladera e inundaciones; asimismo, hubo severos daños en la infraestructura hidráulica, vivienda, infraestructura pública de salud y educación y en las actividades agropecuarias (Bitrán, 2001).

Tabla 1.3: Daños en millones de pesos ocasionados por el desastre de 1999 en Puebla.

SECTOR/CONCEPTO	DAÑOS DIRECTOS	DAÑOS INDIRECTOS	TOTAL	% TOTAL
SECTORES SOCIALES	505	15	520	22.4
Vivienda	486.1		486.1	20.9
Educación	16.4	15	31.4	1.3
Salud	2.5		2.5	0.1
INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS	1540	1	1541	66.3
Agua y saneamiento	84.6	1.8	86.4	3.7
Energía (CFE)	481.1		481.1	20.7
Transporte y comunicaciones	974.3		974.3	41.9
SECTORES PRODUCTIVOS	190.7	35	225.7	9.7
Agropecuario, pesca y forestal	190.7	35	225.7	9.7
Agricultura	132.5	35	167	7.2
Ganadería	15.4		15.4	0.7
Forestal	35		35	1.5
Pesca (acuicultura)	7.8		7.8	0.3
ATENCIÓN A LA EMERGENCIA		38.6	38.6	1.6
TOTAL	2235.7	89.6	2325.3	100

Fuente: Bitrán (2001)



Figura 1.14: Deslizamiento en la Colonia La Aurora en Teziutlán en octubre de 1999 (Fuente: www.cenapred.unam.mx)

El Huracán Stan

El día 1° de octubre de 2005 se generó la depresión tropical No. 20 a una distancia aproximada de 180 km al sureste de Cozumel, Quintana Roo, con vientos máximos de 45 km/h y movimiento al oeste-noroeste a 9 km/h. Durante el día continuó su trayectoria hacia el oeste-noroeste e incrementó los vientos máximos a 55 km/h, cuando se encontraba aproximadamente a 20 km al este de la costa de Quintana Roo, en las cercanías de Punta Estrella, se intensificó a tormenta tropical con vientos máximos de 75 km/h (Hernández-Unzón y Cirilo, 2005).

La tormenta tropical Stan tocó tierra el día 2 de octubre en la costa de Quintana Roo, localizándose a 33 km al noreste de Felipe Carrillo Puerto con vientos máximos de 75 km/h. Durante el transcurso del día 2, Stan cruzó la península de Yucatán en dirección oeste-noroeste; al avanzar sobre tierra perdió fuerza y por la noche se encontraba a 10 km al sureste de la población de Celestún, Yucatán, debilitándose a depresión tropical con vientos máximos de 55 km/h (*Ibid*).

En las primeras horas del día 3, Stan ingresó al Golfo de México cobrando fuerza e incrementándose nuevamente a la categoría de tormenta tropical, con vientos máximos de 65 km/h. Durante el resto del día 3 Stan mantuvo su desplazamiento hacia el oeste, cruzando la parte suroeste del Golfo de México mientras aumentaba la fuerza de sus vientos y sus bandas nubosas afectaban con a los estados de Hidalgo, Puebla, Guerrero, Oaxaca, Chiapas y Veracruz (*Ibid*).

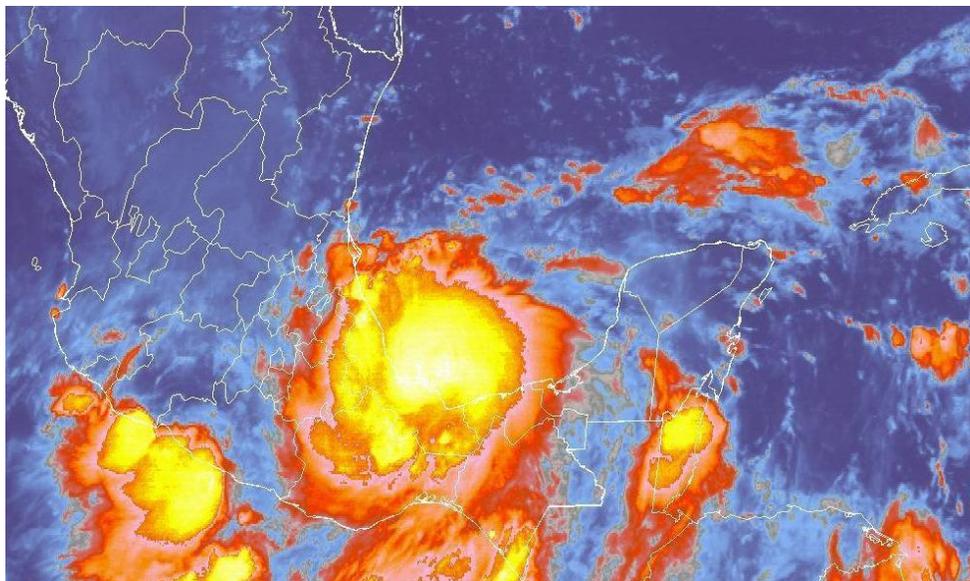


Figura 1.15: Imagen del Satélite GOES, el huracán "Stan" impactando al estado de Veracruz el día 4 de octubre.

En las primeras horas del día 4, se encontraba a 75 km al norte de Coatzacoalcos, Veracruz; se había intensificado a categoría de huracán con vientos máximos de 130 km/h. Stan continuó su trayectoria con rumbo hacia la costa de Veracruz en su porción centro y sur. Por la mañana tocó tierra entre Punta Roca Partida y Monte Pío, a unos 20 km al noreste de San Andrés Tuxtla, con vientos máximos de 130 km/h. En tierra Stan comenzó a perder fuerza y al medio día, cuando se encontraba a 25 km al este-sureste de Villa Azueta, Veracruz, se degradó a tormenta tropical, con vientos máximos de 105 km/h. Por la noche del día 4, al cruzar la Sierra Madre Oriental en la parte norte de Oaxaca, la tormenta tropical Stan se debilitó y pasó a ser depresión tropical (*Ibid*).

Finalmente, en la madrugada del día 5, después de haber avanzado sobre la región montañosa del estado de Oaxaca, Stan entró en proceso de disipación a una distancia de 60 km al oeste de la ciudad de Oaxaca (Figura 1.15).

Stan fue un ciclón que estableció una nueva marca en precipitación con relación al año de 1999; De acuerdo con los registros máximos de precipitación en 24 horas, durante este evento ocurrieron las más intensas lluvias, 307.0 mm en Paraíso Novillero, 247.0 mm en el puerto de Veracruz y Boca del Río (*Ibid*).

Los efectos del huracán “Stan” comenzaron a registrarse en el estado de Puebla el día 3 de octubre y duraron hasta el 7 del mismo mes. Este ciclón se combinó con la onda tropical número 40 y el frente frío número 2, lo que ocasionó daños mayores a la población y sus bienes debido a la gran cantidad de lluvia que provocaron. Los daños más severos se registraron en las regiones de la Sierra Norte y Sierra Nororiental. Hubo 25 poblaciones incomunicadas y una veintena de viviendas arrasadas por la creciente de los ríos; en el municipio de Xochiapulco un deslizamiento sepultó una vivienda donde perdieron la vida 3 personas (CENAPRED, 2006).

A consecuencia de los daños ocasionados por la combinación de estos fenómenos, se solicitó a la Secretaría de Gobernación la Declaratoria de Emergencia con el fin de acceder a los recursos del Fondo Revolviente para atender a la población afectada. En total se publicaron 3 Declaratorias de Emergencia entre el 14 y 21 de octubre en donde se incluyeron 114 municipios del estado. Posteriormente, debido a la gravedad de los daños, la Secretaría de Gobernación emitió la Declaratoria de Desastre para 108 municipios (*Ibid*).

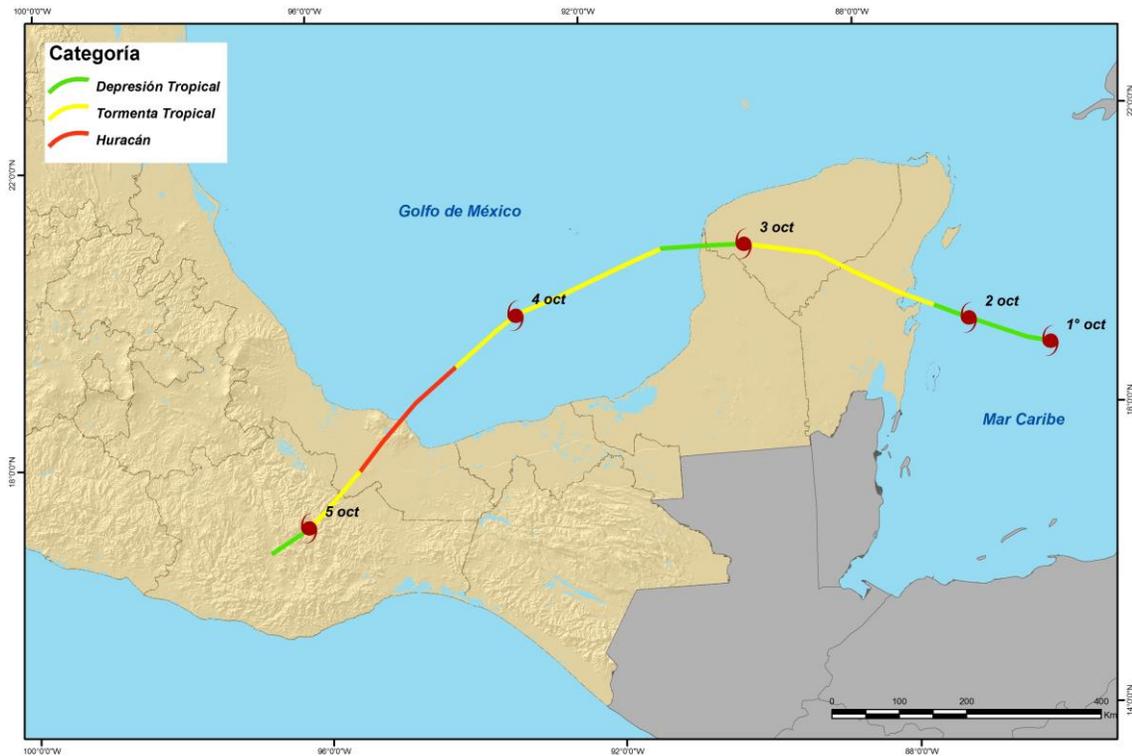


Figura 1.16: Trayectoria del Huracán Stan del 1° al 5 de octubre de 2005. (Fuente: <http://smn.cna.gob.mx>)

El total de daños cuantificados en el estado de Puebla fue aproximadamente de 917,3 millones de pesos. Los daños en la infraestructura física representaron más del 60% del total de los daños registrados a consecuencia del huracán; sin duda, el sector más afectado fue el de las comunicaciones y transportes (Tabla 4).

En total fueron 77 los municipios que presentaron afectaciones en sus vías de comunicación. Se reportaron en total 426 caminos con daños con una longitud de 3.544 kilómetros. La Red Estatal fue la que presentó mayores afectaciones con un monto estimado de 374 millones de pesos para resarcir los daños. La Red Municipal también sufrió daños de consideración, para atenderlos se destinó un monto de 167 millones de pesos (*Ibid*).

Es importante mencionar que los daños a la infraestructura carretera en los 77 municipios afectados, afectaron a una población de más de un millón de personas, de las cuales una cantidad considerable permaneció incomunicada por un prolongado periodo.

Tabla 1.4: Daños en millones de pesos ocasionados por el Huracán Stan en 2005 en Puebla.

SECTOR/CONCEPTO	DAÑOS DIRECTOS	DAÑOS INDIRECTOS	TOTAL	% TOTAL
SECTORES SOCIALES	246.8	18.6	265.5	28.9
Vivienda	163.4	4.7	168.1	18.3
Educación	64.6	1.4	66.1	7.2
Salud	11.6	12.4	24	2.6
Infraestructura hidráulica (CNA)	7.1	0	7.1	0.8
INFRAESTRUCTURA	540.8	17.1	558	60.8
Sector eléctrico	0.3	0.01	0.31	0
Obras públicas	0	0.9	0.9	0.1
Transporte y comunicaciones	540.5	16.2	556.7	60.7
SECTORES PRODUCTIVOS	19.8	0	19.8	2.2
Agropecuario	19.8	0	19.8	2.2
ATENCIÓN A LA EMERGENCIA	0	73.9	73.9	8.1
TOTAL	807.5	109.7	917.3	100

(Fuente: CENAPRED, 2006)

Deslizamiento en Santa María Tlahuitoltepec, Oaxaca

El 28 de septiembre de 2010 en el Municipio de Santa María Tlahuitoltepec, localizado en la Sierra Mixe en el estado de Oaxaca, ocurrió un movimiento de ladera originado por los remanentes de la tormenta tropical Matthew (Díaz, 2010). Este evento causó gran alerta a las autoridades estatales y federales debido a que de manera inmediata se informó que habían quedado sepultadas 300 viviendas y había más de 1000 muertos (El Universal, 28/09/10). Sin embargo, esta cifra fue errónea y fue rectificada en varias ocasiones, para finalmente registrar 11 personas desaparecidas, 2 viviendas sepultadas y otras 7 más con daños severos. La información errónea inicial se relacionó con las condiciones ambientales presentes en aquel momento, las cuales impedían la visibilidad por lo que reino el temor en los habitantes a la ocurrencia de otros movimientos de ladera. Cabe destacar que la atención de la emergencia se dificultó debido a que ocurrieron 30 deslizamientos más en las vialidades que comunican a esta localidad con la capital de estado, por lo que la ayuda terrestre y aérea no pudo llegar de forma expedita.



Figura 1.17: Deslizamiento en Santa María Tlahuitoltepec, Oaxaca (Fuente: Núñez y Medrano, 2010).

Derrumbe en la Autopista México-Querétaro

El 26 de mayo de 2013, en el kilómetro 71 de la Autopista México –Querétaro, localizado cerca del ejido del Carmen, perteneciente al municipio de Tepeji del Río en el estado de Hidalgo, una intensa tormenta acompañada de granizo provocó el reblandecimiento del suelo, lo que posteriormente originó un desplazamiento de 40 metros cúbicos de suelo y rocas sobre la carpeta asfáltica. Cinco vehículos quedaron sepultados, de los cuales 2 personas que viajaban en una camioneta y otras 5 en un taxi, perdieron la vida. Las intensas lluvias que azotaron esta zona, provocaron un fuerte deterioro en la infraestructura carretera; las vías más afectadas son las que comunican a la localidad de El Salto con el tramo de la antigua carretera México-Querétaro y la carretera Tepeji-Santa María Iluacán (www.topos.mx).



Figura 1.18: Desprendimiento de rocas y suelo en la Autopista México-Querétaro (Fuente: www.unionjalisco.mx).

CAPÍTULO 2. MÉTODOS, TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS: DETERMINACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD A PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA.

El mapa de zonas susceptibles a procesos de remoción en masa se realizó mediante el uso de un sistema de información geográfica (SIG). En este sistema se utilizaron dos tipos de datos principales; el primero son las capas de información geográfica (capas base), las cuales se crean a partir de diversas técnicas y materiales, el segundo es un inventario generado por medio del trabajo de campo y la percepción remota, que consiste en información espacialmente referenciada de los PRM con sus determinadas características. Con los datos mencionados anteriormente fue posible calcular el grado de susceptibilidad por medio de operaciones que se indican de manera detallada en los apartados correspondientes a las metodologías del “análisis multicriterio” y “pesos de evidencia”.

2.1 Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Los sistemas de información geográfica (SIG) están relacionados al manejo de grandes bases de datos y a la cartografía automatizada, por lo que han desarrollado excesivamente estos campos y situado su función en el análisis y manejo de la información geográfica (García, 2003).

Burrough (1987) señala que los SIG son el resultado de una combinación de desarrollos de cómputo realizados por diversas disciplinas y técnicas (cartografía, fotogrametría, tecnología de sensores remotos, representación gráfica etc.) relacionadas con el procesamiento de datos espaciales. Los SIG son una herramienta técnica desarrollada en el campo del quehacer geográfico, han destacado, por facilitar las tareas que son características de la Geografía, por ejemplo el análisis, integración y síntesis de los procesos espaciales (Tabla 2.1).

La utilización de los SIG es muy importante en el ámbito de la prevención de desastres, el uso de un SIG resulta de gran utilidad para determinar la distribución territorial, una evaluación y el análisis de peligros y amenazas naturales (sismos, erupciones volcánicas, inundaciones, PRM, tsunamis) a los que está expuesta la población y sus bienes, esto con fines de mitigación y prevención (Alcántara-Ayala, 2009).

Aunque actualmente los SIG son utilizados en gran medida para elaborar mapas, también están concebidos y equipados para hacer mucho más funciones, especialmente en el terreno del análisis geográfico. Por medio de estas herramientas es posible comprender la organización territorial de algún fenómeno o elemento de estudio, actualizar constantemente la información, evaluar la precisión de la misma y crear nueva información relevante, con el fin de profundizar en el entendimiento de la dinámica de un territorio y la distribución espacial de cualquier fenómeno. Todo para orientar en la toma de decisiones y preparar de antemano las condiciones para futuros eventos (García, 2003).

Tabla 2.1: Uso de los sistemas de Información Geográfica

LOS SIG ESTAN DISEÑADOS PARA:	
1	Inventariar información geográfica
2	Realizar análisis espaciales
3	Expresar cartográficamente los resultados

Fuente: (Tomlison, 1990)

2.1.1 Definición de SIG.

La definición de SIG es algo muy complejo, ya que existen diversos conceptos en función del número de autores y especialistas en el tema; cada autor genera su definición desde su perspectiva y el uso que le esté dando al sistema quitando o agregando elementos de los enunciados originales con la finalidad de innovar el concepto (Quintero, 2009).

De acuerdo con Lewis y Fletcher (1991), técnicamente se definen como "...una tecnología computacional compuesta por equipo (hardware), programas (software) y datos, empleados para capturar, editar, representar, y lo más importante analizar información geográfica...".

DoE (1987) indica que un SIG es "... un sistema para capturar, almacenar, revisar, manipular, analizar y desplegar datos que están espacialmente referidos a la Tierra...).

Por otra parte Quintero (2009) menciona una definición formal y una informal; la primera dice que un SIG "... es una herramienta de análisis espacial para resolver problemas por medio de modelos que permiten encontrar patrones y entender cuáles son los eventos que dan origen a los

fenómenos que se estudian...”, la segunda indica que “... el arte de expresar de la forma más abstracta posible la realidad...”.

Burrough (1987) dice que un SIG es (...un poderoso juego de herramientas para coleccionar, almacenar y recuperar a voluntad, transformando y desplegando datos espaciales del mundo real...).

Dueker (1979) los define como (... un caso especial de sistemas de información donde la base de datos consiste en observaciones de rasgos distribuidos espacialmente, actividades o eventos que son definidos en el espacio como puntos, líneas o áreas...)

2.1.2 Componentes de un SIG.

Un SIG se compone de cinco elementos (Figura 2.1):

1- Datos: Corresponden a la información espacial, cualitativa y cuantitativa de los elementos de un espacio.

2- Equipo (hardware): Representa el equipo instrumental de los SIG, cuya operación requiere de equipos con alta capacidad de procesamiento y buena capacidad de almacenamiento de datos.

3- Programas de operación (software): Representan a la tecnología de procesamiento de la información. Se integran de una serie de instrucciones necesarias para ejecutar una tarea determinada, ejemplo Arc/Info, Erdas Imagine, Ilwis, ArcGis, GRASS, Quantum Gis.

4- Personal: El operador o el usuario es parte del sistema.

5- Métodos: Los procedimientos y operaciones que se realizan para obtener los resultados deseados, ejemplo: análisis multicriterio.



Figura 2.1: Componentes de un SIG. (Fuente: www.tesis.ufm.edu.gt)

2.1.3 Tipos de datos en un SIG.

Los datos que se manejan en un SIG se dividen y clasifican en locacionales y no locacionales (García, 2003).

Los datos locacionales se refieren a la localización y configuración de los elementos en términos de la relación lugar-posición y son registrados con el sistema por medio de una serie de pares coordenadas, estos datos se representan por medio de figuras geométricas. Los datos no locacionales son los elementos descriptivos que indican las características o variables de las unidades espaciales (nombres, valores, estadísticas, referencias, etc.).

El sistema vincula a través de sus propios mecanismos, los datos locacionales con los no locacionales, esto con el fin de generar la base de datos. La conformación de la base de datos es una condición primordial para la operación de un SIG, cuyo funcionamiento depende de la organización, calidad y veracidad de la información. Los datos provienen de fuentes y métodos de captura muy diversos, es decir que derivan de materiales impresos, mapas digitales, datos capturados por medio de sistemas de posicionamiento global (GPS), imágenes de satélite, etc. por lo que se debe tener un buen control en el proceso de conversión de datos y de la homogeneización de escalas y proyecciones (Figura 2.2).

La estructura de las bases de datos en un SIG se divide en 2 tipos, el formato vectorial que utiliza los elementos punto, línea y polígono, y el formato raster que se basa en la unidad fundamental de celda o pixel, las cuales definen toda una capa de información geográfica (Figura 2.3).

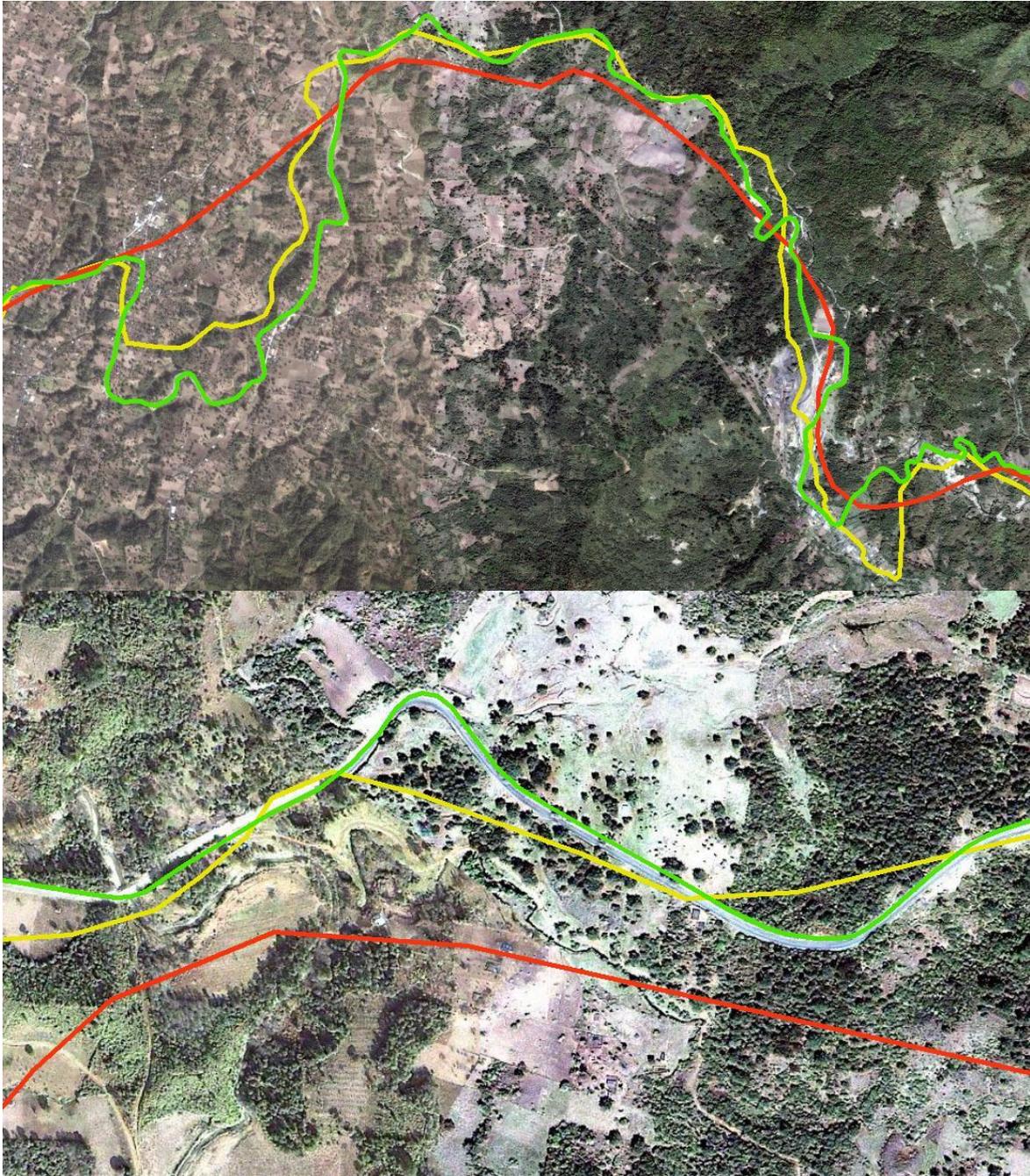


Figura 2.2 La información geográfica proveniente de diversas fuentes es muy variada. En las imágenes se muestra un tramo de la carretera estatal Aire Libre – Hueyapan en el estado de Puebla, la línea roja y amarilla corresponden a datos provenientes de instituciones oficiales de México y la línea verde corresponde a un trazo basado en una imagen de satélite proveniente de Map server de ESRI. (Fuentes: Conjunto de datos vectoriales INEGI, Conjunto de datos vectoriales IFE, www.arcgis.com/home/item.htm).

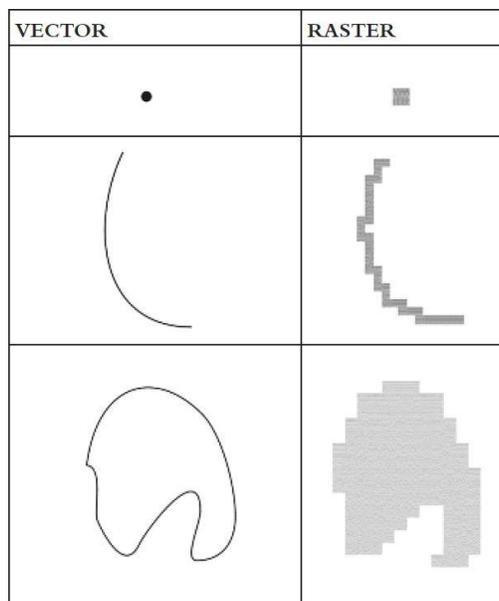


Figura 2.3 Formato vectorial y raster (Fuente: Harmon y Anderson, 2003)

2.2 Capas base.

Las capas base son las capas de información geográfica que se utilizan para obtener el mapa de zonas susceptibles a PRM. En el presente trabajo se utilizaron 8 capas, de las cuales 5 representan información cualitativa de rasgos físicos del lugar y sirven para elaborar mapas temáticos; las 3 restantes representan información cuantitativa del terreno, de la cual se derivan mapas morfométricos (Tabla 2.2).

Tabla 2.2: Capas o cartografía base

Mapas temáticos		Mapas morfométricos	
1	Geología	6	Grado de pendiente
2	Edafología	7	Disección del relieve
3	Uso de suelo	8	Densidad de disección
4	Orientación de la ladera		
5	Geometría o forma de la ladera		

Dichas capas de información o parámetros fueron seleccionados ya que contienen datos del terreno que corresponden a factores que influyen en la inestabilidad de laderas, sin embargo estos factores no influyen de manera homogénea debido a que cada uno tiene un peso específico y dependen de las condiciones en que se presenten los PRM. El tipo de roca, el tipo de suelo, la cobertura vegetal, la disposición de una ladera, la forma del relieve, el grado de pendiente, la disección del relieve y la presencia de corrientes de agua son elementos fundamentales de la inestabilidad de laderas que han sido considerados en diversos trabajos e investigaciones (Borja-Baeza y Alcántara-Ayala, 2009; Budetta y Vivencio, 2008; Castellanos-Abella y Van-Westen, 2008; Glade, 2003; Regmi *et al.*, 2010).

2.2.1 Geología

De acuerdo con Sharpe (1938 citado en Suárez, 1998), la geología es uno de los factores permanentes y de gran importancia para determinar la inestabilidad de laderas, debido a que este factor influye internamente en las formas de relieve y determina propiedades de la dureza física de los materiales. De igual manera Rib y Liang (1978) mencionan que es importante porque condiciona las características estructurales tales como las discontinuidades, fallas y pliegues.

El mapa se realizó con el uso del software ArcGIS 9.3 de ESRI. Se utilizaron como base 2 cartas geológicas en formato digital del Servicio Geológico Mexicano, las hojas Teziutlán E14-B15 (SGM, 2011) y Altotonga E14-B16 (SGM, 2010) escalas 1: 50 000; éstas cartas se georeferenciaron para posteriormente hacer un mosaico o unión con las mismas. Posteriormente se hizo un recorte o extracción del área de estudio, y una vez obtenida el área de estudio se procedió a usar una técnica denominada digitalización para trazar las unidades geológicas. A estas se le asignó información que incluyó litología y era geológica; se generó una capa de información en formato vectorial, la cual se transformó en formato raster con el fin de obtener el número de píxeles que ocupa cada unidad y posteriormente poder realizar combinaciones con las otras capas. Finalmente se le dio formato asignando colores a los diversos tipos de roca (Figura 2.4).

2.2.2 Edafología

Las características de los suelos son importantes para la presencia de la inestabilidad de laderas (Varnes, 1978), Existen suelos que están conformados por materiales frágiles, desmenuzables e intemperizados, que en combinación con una fuerte pendiente están más expuestos a moverse.

El mapa de edafología se realizó de la misma manera que el mapa de geología, sin embargo, sólo se georeferenció una carta digital, la carta edafológica Veracruz (INEGI, 1984) escala 1:250 000 fue la base de esta capa de información. Se extrajo el área de interés y se digitalizaron las unidades edáficas, se asignaron sus datos a cada unidad que incluyen las unidades dominantes y subunidades, por último se convirtió a formato raster y se dio formato final (Figura 2.5).

2.2.3 Uso del suelo

Este parámetro ha adquirido mayor importancia en los estudios de inestabilidad de laderas debido a que en los últimos años los cambios de uso del suelo se han dado con gran frecuencia principalmente por actividades antrópicas; la deforestación ha sido el factor que ha influenciado de manera significativa (Borja-Baeza *et al.*, 2006).

El mapa de uso del suelo se elaboró por medio de una clasificación digital con base en 3 imágenes de satélite SPOT en el software ENVI 4.7. Dichas imágenes fueron tomadas el día 26 de octubre de 2011 y tienen una resolución espacial de 10 metros. La clasificación digital se refiere a la obtención de una nueva imagen, en la cual cada uno de los píxeles de la imagen original, definidos por un valor denominado “nivel digital”, son asignados dentro de una determinada categoría o rango de acuerdo a los tipos de cubierta vegetal o usos de suelo que se observan (Chuvienco, 1990).

El procedimiento para realizar la capa fue el siguiente:

Se generó un mosaico con 3 imágenes de satélite, a partir del cual se extrajo un corte del área de estudio; sobre este corte se trazaron regiones de interés (ROIs) que corresponden a polígonos que indican muestreos sobre los elementos que se observan en la imagen. En las regiones de interés se asignaron 5 unidades o categorías: de color verde las zonas forestales, en amarillo las zonas urbanas, de anaranjado las zonas agrícolas, en verde olivo los pastizales y de color café las zonas de suelo desnudo. Una vez trazadas diversas regiones de interés, sobre la imagen se procedió a realizar la clasificación digital de tipo supervisada debido a que ya se tenía un conocimiento previo de la zona. El software mencionado anteriormente les asignó a todos los píxeles de la imagen una unidad o categoría determinada, de acuerdo a la región de interés en donde se encontraban los píxeles con niveles digitales semejantes. El resultado obtenido fue una imagen en formato *ENVI Classification* que muestra únicamente las 6 categorías mencionadas anteriormente. Esta imagen se convirtió a formato raster para poder ser procesada en el software

ArcMap; en dicho programa se rectificaron los píxeles para que estos coincidan o empalmen con los píxeles del resto de las capas base con el fin de obtener el mapa de susceptibilidad (Figura 2.6).

2.2.4 Pendiente

La pendiente se refiere al ángulo de inclinación de una superficie con respecto al plano horizontal, es uno de los factores más importantes en el estudio de inestabilidad de laderas debido a su relación directa con la fuerza de gravedad y a sus características tales como son la amplitud, la extensión y la inclinación.

El mapa de pendientes se realizó a partir de las curvas de nivel del conjunto de datos vectoriales correspondientes a las cartas topográficas Teziutlán E14B15 y Altotonga E14B16 escala 1:50 000 provenientes del INEGI. En el software ArcGis 9.3 se elaboró una interpolación basada en los valores de altitud de las curvas de nivel para generar un modelo digital de terreno (MDT). A partir de este modelo se derivó la pendiente, tomando en cuenta las relaciones existentes entre los valores de un píxel y sus ocho vecinos; de esta manera se establecen los valores de pendiente que existen entre valores altimétricos y las configuraciones que describen (Peet y Sahota, 1985; Philipp y Smadja, 1994; Cocquerez y Philipp, 1995). Una vez obtenida la capa de pendientes se asignaron 6 rangos a los píxeles con sus respectivos colores (Figura 2.7).

2.2.5 Densidad de disección

La densidad de disección se refiere al equivalente de la densidad de las corrientes fluviales, sin embargo ésta se diferencia por que su objetivo no son las corrientes en sí, sino el resultado de su acción, que da origen a líneas llamadas talwegs, causadas por la erosión fluvial (Lugo-Hubp, 1991); esta acción de erosión sobre el relieve es un factor que contribuye a la generación de PRM.

La capa se generó usando como base el conjunto de datos vectoriales de la red hidrográfica escala 1:50 000 de las cuencas de los ríos Nautla y Tecolutla de la Región Hidrográfica 27 (INEGI 2011). El parámetro de la densidad se obtiene dividiendo la longitud total de las corrientes fluviales (Km) de determinada superficie entre el área (Km²) de dichas superficies asignadas. Realizando esta función en el software ArcGis se genera un archivo raster en donde cada píxel tiene asignado un valor de densidad (Km/ Km²), estos valores se agruparon en 6 rangos y finalmente se obtiene el mapa respectivo (Figura 2.8).

2.2.6 Profundidad de disección

La profundidad de disección es la altura (m) de un corte del relieve por erosión fluvial y corresponde a la distancia vertical que hay entre el talweg y el parteaguas (Lugo-Hubp, 1991). Este parámetro morfométrico tiene diversas aplicaciones en el estudio de la evolución del relieve por lo que ha sido considerado en este estudio para determinar las posibles ocurrencias de PRM.

La capa de profundidad de disección se generó usando de base dos cartas topográficas correspondientes a las hojas Teziutlán E14-B15 (INEGI, 2008) y Altotonga E14-B16 (INEGI, 2005) escalas 1: 50 000. En ambas hojas se delimitó el área de estudio; sobre ésta se trazó una malla con cuadros de 4 por 4 centímetros lo que equivale a 4 Km² en el mapa, y en cada cuadro se identificaron los valores de la curvas de nivel que se encontraban en talweg y el parteaguas. Con ambos valores se hizo una diferencia y se obtuvo el valor de la disección (m), dicho valor se le asignó al centro de cada cuadro y se anotó en una tabla del programa Excel, al igual que las coordenadas "X" y "Y" correspondientes al centro del cuadro. Una vez obtenidos los valores de profundidad de disección de toda el área de interés, la tabla de Excel se introdujo al software ArcGis para obtener la distribución de los puntos con sus respectivos valores de disección en formato vectorial. Se hizo una interpolación de los puntos y se generó una capa raster donde a cada pixel se le asigno su valor de disección.

Por otra parte, se elaboró una capa de contornos que se ajustan a la morfología de los tipos de relieve, la cual se obtuvo mediante la disposición y densidad de las curvas de nivel, los valores de la capa resultante se dividieron en 10 categorías o áreas; después con el uso de la herramienta "zonal statistics" del software ArcGis, se promediaron los valores de los pixeles de la profundidad de disección con los pixeles de las 10 áreas mencionadas. Este procedimiento se realizó para afinar los límites de la profundidad de disección a contornos espaciales más concretos (Priego-Santander *et al.*, 2003). Finalmente se reclasificaron los valores de los pixeles formando 6 categorías para representarlo en el mapa (Figura 2.9).

2.2.7 Geometría o forma de la ladera

La geometría o forma de la ladera es considerada como el perfil de una ladera debido a su relación con la pendiente (Douglas, 1977). En un corte perpendicular del perfil se miden ángulos y distancias en donde se observan una serie de irregularidades que corresponden a concavidades y

convexidades que son causadas por la litología y los procesos que influyen en la morfología de la ladera; estos diversos perfiles permiten caracterizar a una ladera de acuerdo a diversas formas geométricas elementales (cóncavo, convexo y plano) que fueron establecidas por Savigear (1952). Este parámetro fue considerado debido a que las laderas cóncavas están relacionadas con la presencia de corrientes fluviales y a la captación de agua en los suelos, mientras tanto las formas convexas están más relacionadas por su exposición a la remoción de materiales.

El mapa de geometría de la ladera se generó en el software ArcGis usando como base el modelo digital de terreno creado al elaborar el mapa de pendientes, en este mismo al disminuir los valores altimétricos de los píxeles con respecto a sus vecinos se asignaba un valor negativo (cóncava), al aumentar el valor era positivo (convexo) y al mantenerse constantes el valor era 0 (plano), así a todos los píxeles de la imagen obtienen un valor que determina la configuración o geometría del terreno. Por último los píxeles fueron reclasificados de acuerdo a las tres categorías mencionadas anteriormente, se les asignó color para finalmente crear mapa (Figura 2.10).

2.2.8 Orientación de la ladera

La dirección de la ladera es un parámetro complementario que fue considerado debido a que en visitas previas al área de estudio se observó que los PRM ocurrían en laderas que miran al este, esto es causado por que estas laderas están más expuestas a recibir humedad proveniente del Golfo de México, por lo tanto el suelo se satura más y es más susceptible a deslizarse, sin embargo este factor no es considerado de gran relevancia en otras investigaciones debido a que es una característica local de la zona.

La capa de dirección de la ladera se realizó de manera automatizada en el software ArcGis mediante el modelo digital de terreno; de acuerdo a la disposición y valores altimétricos cada píxel el software asigna un valor de azimut (0° a 360°) se agrupan en 8 categorías (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW), con esto se genera una capa raster la cual se reclasifica para que los píxeles agrupados en cada categoría tengan un mismo valor (Figura 2.11).

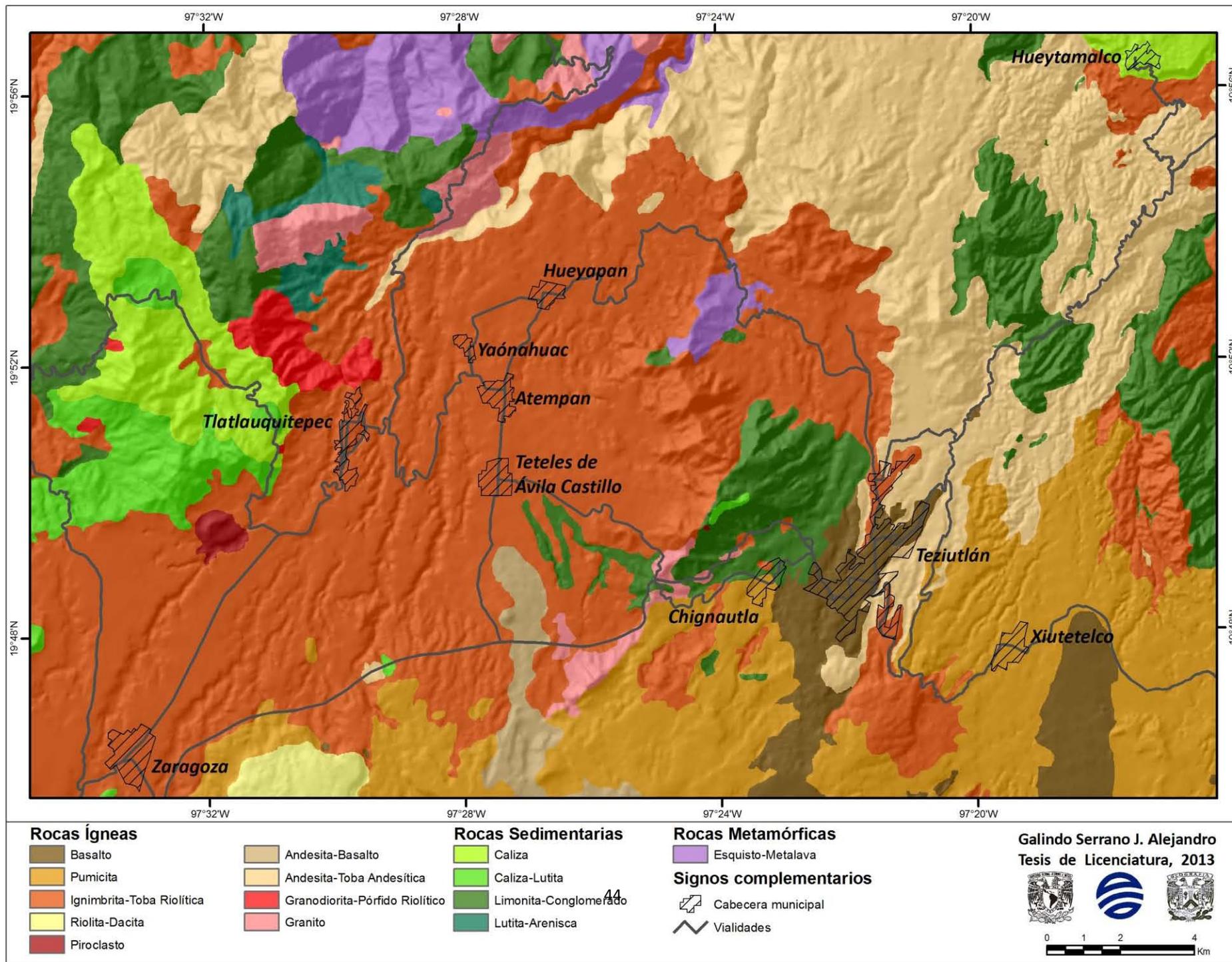


Figura 2.4: Tipos de roca.

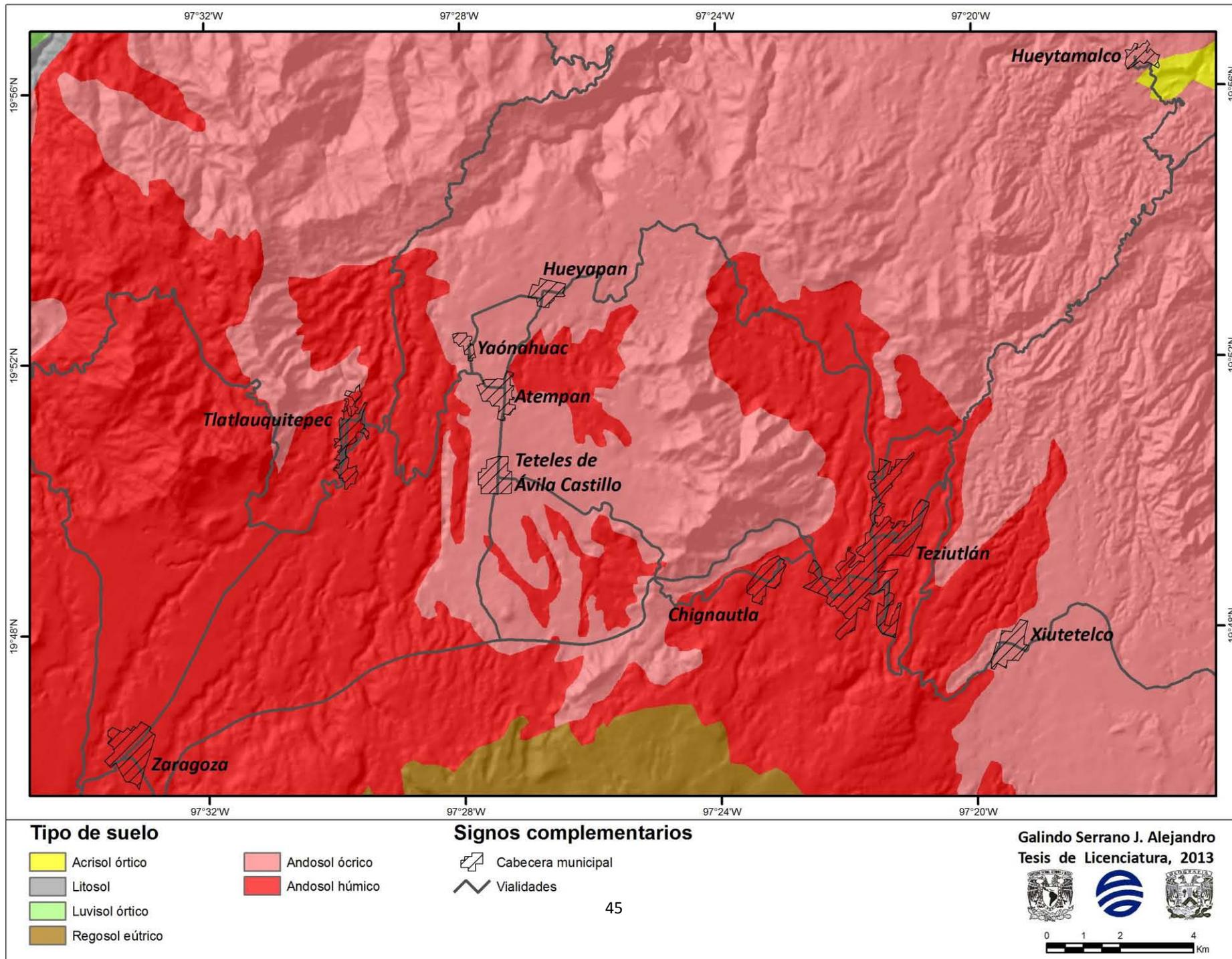


Figura 2.5: Tipos de suelo.

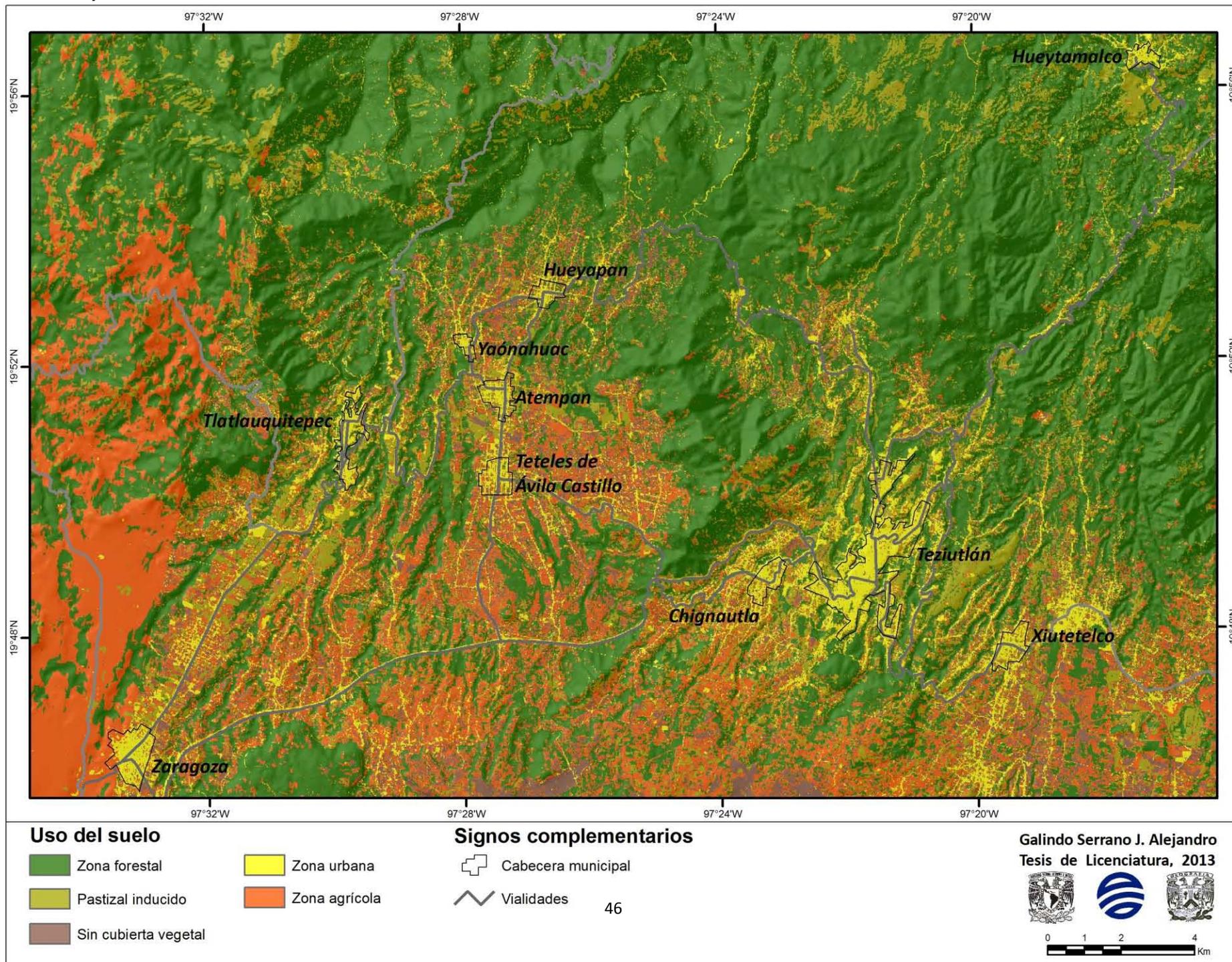


Figura 2.6: Uso del suelo.

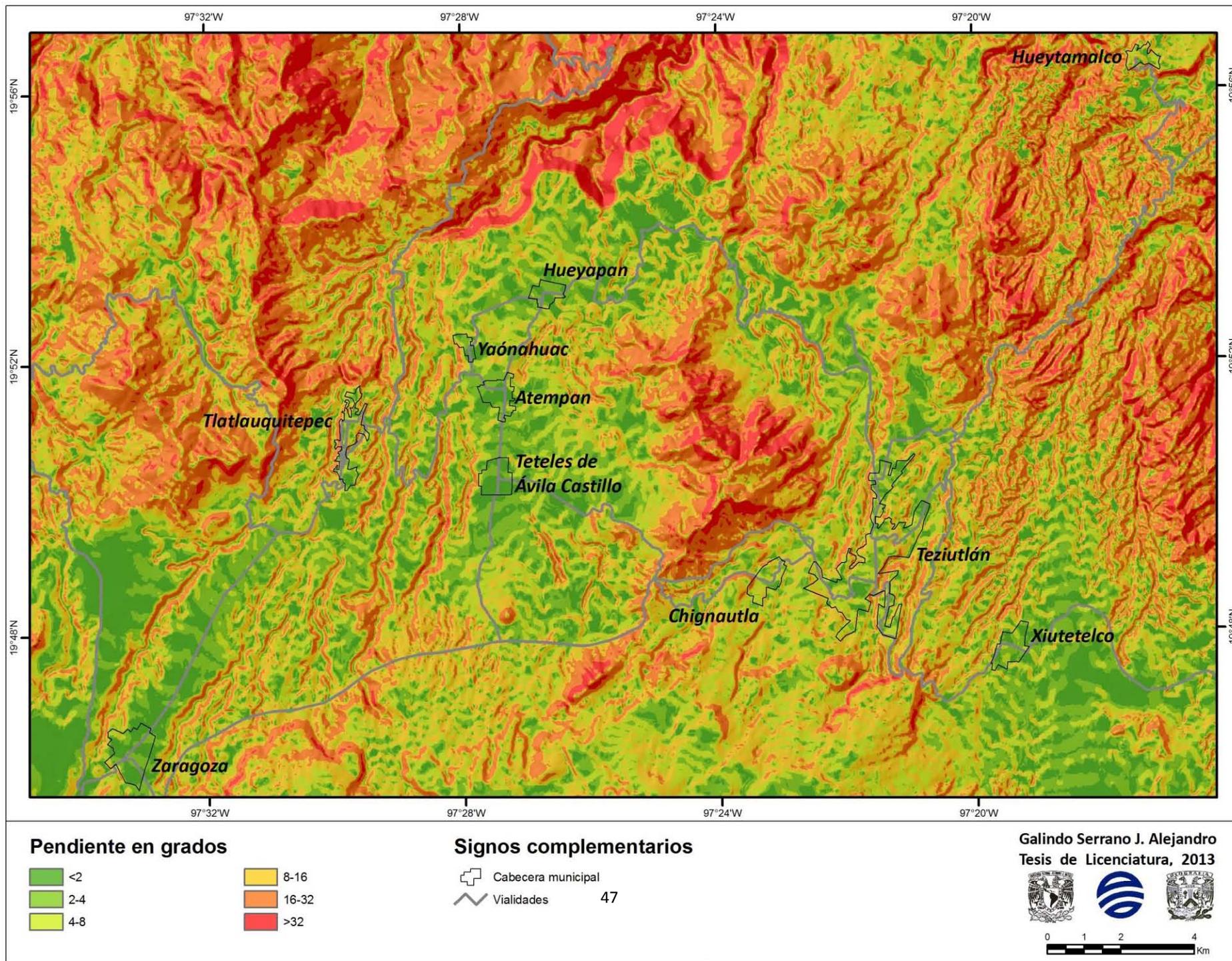


Figura 2.7: Mapa de pendientes.

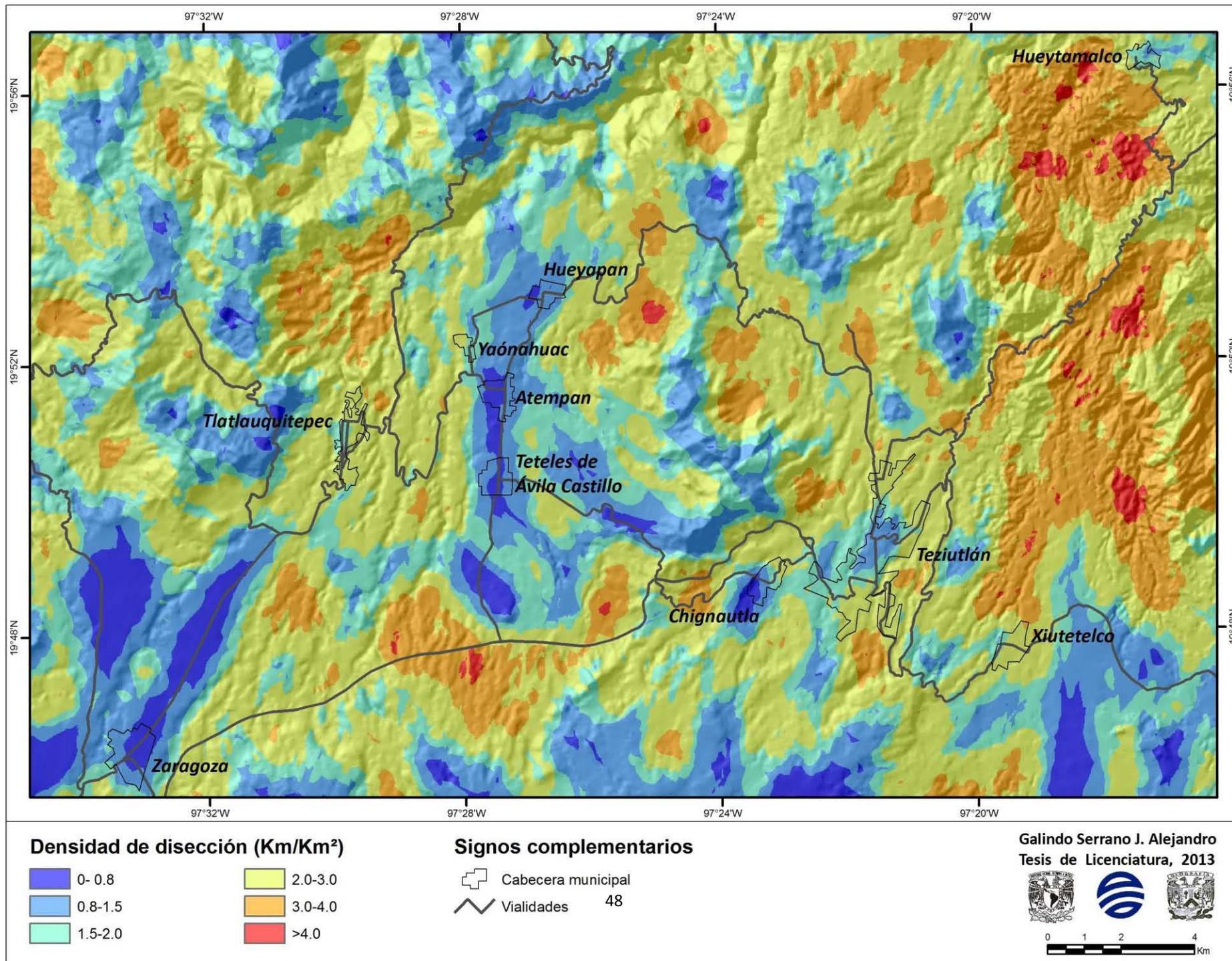


Figura 2.8: Densidad de disección.

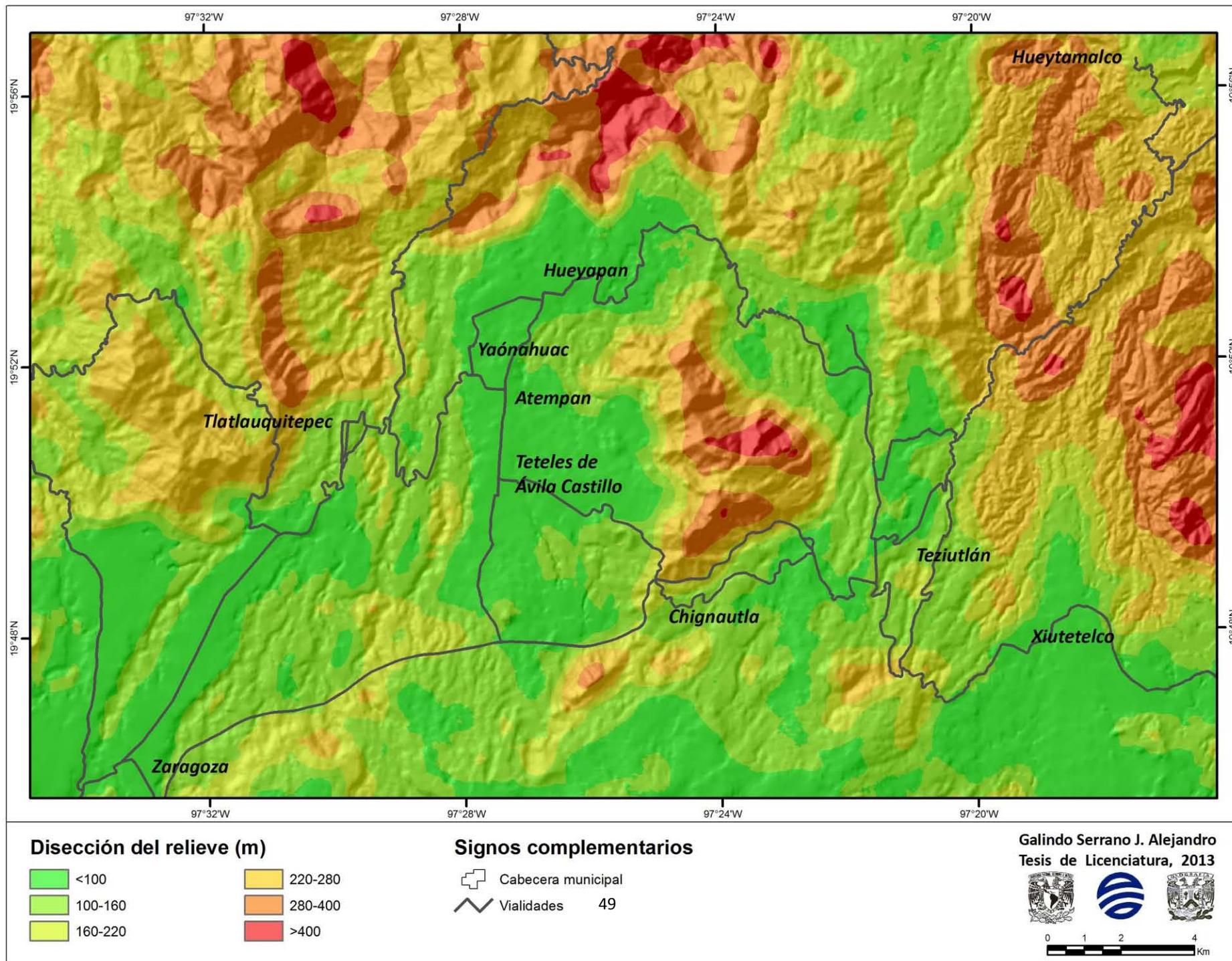


Figura 2.9: Mapa de Profundidad de Disección.

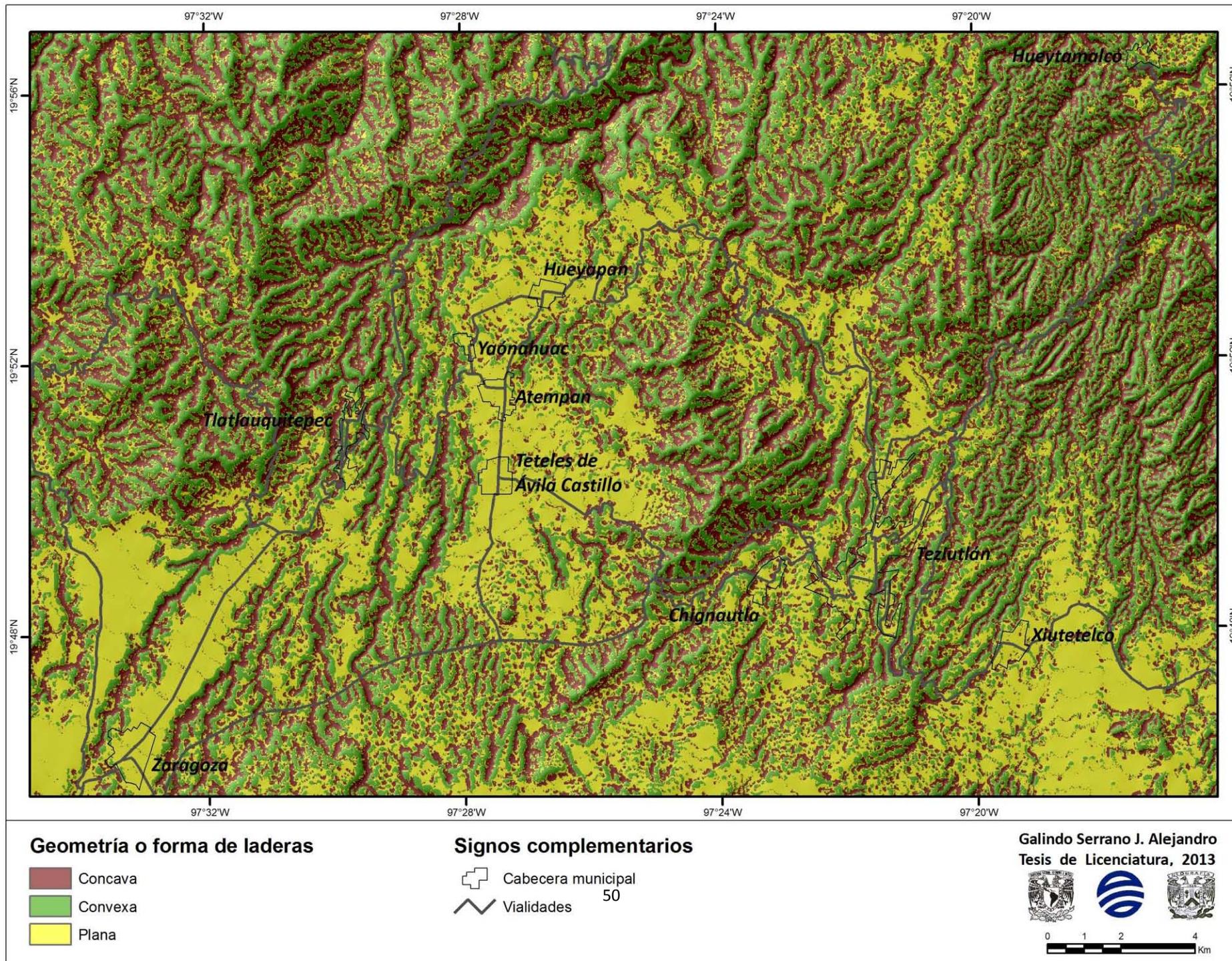


Figura 2.10: Mapa de Geometría de laderas.

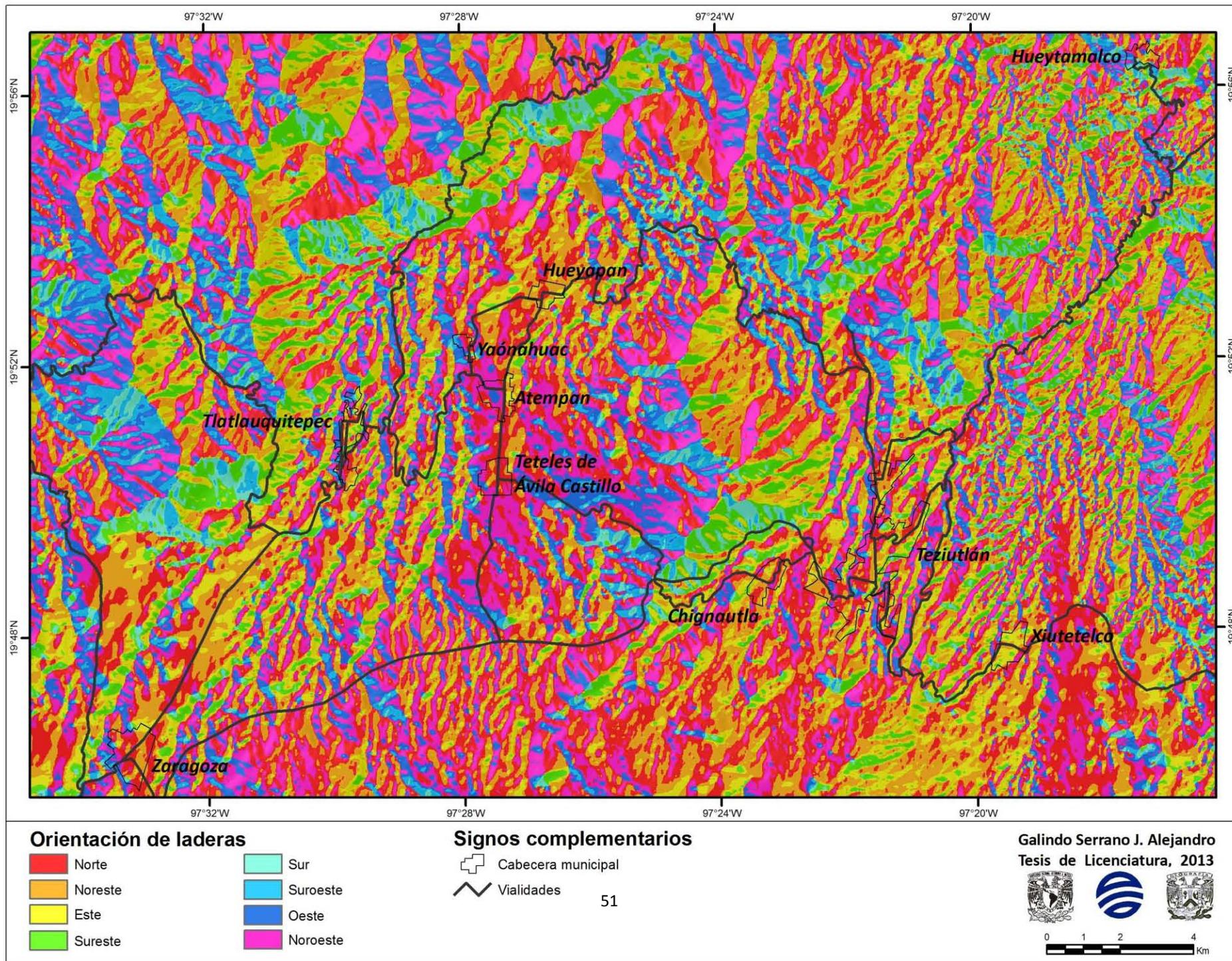


Figura 2.11: Mapa de Orientación de laderas.

2.3 Inventario de PRM

El inventario de PRM es una herramienta fundamental para la generación de cartografía (Hansen, 1984; Parise, 2000) por lo que los datos que contienen pueden ser analizados en combinación con otros elementos y así es posible realizar trabajos más precisos relacionados con la evaluación de amenazas. El inventario se define como la relación ordenada de la ocurrencia y características de los procesos de remoción en masa en un territorio determinado (Murillo-García y Alcántara-Ayala, 2008).

Para esta tesis se creó un inventario por medio de 2 procedimientos, uno de ellos fue a través de observación directa en campo y la recolección de datos se hizo con el uso de un sistema de posicionamiento global (GPS); el otro fue la percepción remota, que mediante el uso de imágenes de satélite SPOT del año 2011, el servidor de Google Earth y el SIG ArcGis 9.3 se generaron los datos.

2.3.1 Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

El *Global Positioning System* (GPS) por sus siglas en inglés, es un programa de navegación y posicionamiento basado en el uso de 24 satélites propiedad del gobierno de los Estados Unidos (Hurn, 1989). Esta tecnología es la herramienta más completa para el registro geográfico de los rasgos o elementos presentes en algún lugar de la superficie terrestre, además contribuye a la recopilación y actualización de la información geográfica.

Son 3 los componentes de funcionamiento de un GPS:

1) Segmento del espacio. Está conformado por 21 satélites artificiales activos y 3 más de reserva los cuales están uniformemente distribuidos en 6 órbitas, cada uno emite una señal de radio en la que transmite un código acerca de su localización orbital y del estado del sistema en su totalidad (Niezen, 2001).

2) Segmento control. Está conformado por 5 estaciones terrestres distribuidas alrededor del mundo a lo largo del Ecuador para monitorear a los satélites y transmitir el mensaje de navegación a fin de que lo usuarios logren el uso total de la información (Backhoff, 2002).

3) Segmento del usuario. Comprende a los usuarios que emplean las señales GPS para fines cartográficos, de navegación e investigación. El funcionamiento del receptor es sencillo y su función primaria es adquirir señales, al captar las señales de un mínimo de 3 satélites, por triangulación, el receptor determina la posición que ocupa sobre la superficie de la Tierra mediante el valor de coordenadas latitud y longitud. También tienen funciones como recuperar datos orbitales, hacer mediciones de distancias y procesar esta información en tiempo real para obtener información en tiempo real para obtener posición, velocidad y tiempo del usuario (Ibid).

2.3.2 Trabajo de campo

El trabajo de campo es una técnica (De Pedraza, 1996) necesaria e indispensable que consiste en la observación directa y toma de datos de un fenómeno o elemento de interés. Este trabajo se realizó en diciembre de 2011. Las actividades que se realizaron fueron: reconocimiento del área de estudio, recorridos por toda la red carretera para conocer sus características y condiciones, verificación de los aspectos físicos representados en los mapas temáticos, identificación de zonas potenciales a la ocurrencia de PRM, la identificación, caracterización y georeferenciación de los PRM.

Los datos se recopilaron de dos formas: de manera manual y automática. De manera automática con el uso del GPS se almacenaron puntos de localización de los PRM y se les asignó un número para tener un identificador único; los datos se guardaron en formato *shapefile* (shp). También de forma manual se elaboraron fichas de campo en las que se registraron datos cualitativos de los puntos identificados, tales como el nombre, localización, tramo carretero, kilometraje, tipo de PRM, la geometría de las laderas, características físicas del lugar, tipo de relieve, actividades antrópicas y se asignó asimismo un identificador único para posteriormente empalmar esta información con la registrada en el GPS.

Los recorridos realizados se dividieron en 3 sectores:

- 1- El recorrido inició en el kilómetro 114 de la Carretera Federal N° 129 correspondiente al tramo Amozoc-Teziutlán en la localidad de Acuaco en el municipio de Zaragoza y se concluyó en el kilómetro 128 de la misma en la cabecera municipal de Teziutlán. Esta carretera comunica las cabeceras municipales de Zaragoza Tlatlauquitepec, Atempán, Tétéles de Ávila Castillo, Chignautla y Teziutlán. En este trayecto se recorrieron carreteras

de carácter estatal y municipal, las cuales son alimentadoras a la mencionada anteriormente, estas son el Libramiento Tlatlauquitepec- Hospital General, la Carretera Estatal Entronque carretera Federal N° 129-Yaonahuac , la Carretera Municipal Yaonahuac-Hueyapan, la Carretera Estatal Hueyapan-Tételes y la Carretera Municipal Entronque Km 122.5 de la Autopista Virreyes/Teziutlán-Atempan.

- 2- La segunda parte del recorrido se inició al norte de la ciudad de Teziutlán en la Carretera Estatal Teziutlán-Aire Libre con sus ramales, que son caminos de tipo municipal y comunican a las localidades de Acateno y Coyotzingo. Después se prosiguió con su continuación la Carretera Estatal Aire Libre-Hueyapan-Teteles. Posteriormente se recorrió a Carretera Federal N° 131 Teziutlán-Perote al sureste de la ciudad de Teziutlán, en la cual se levantaron datos del kilómetro 0 al kilómetro 11. En este último se encuentra el límite estatal entre Puebla y Veracruz; esta vialidad comunica a la cabecera municipal de Xiutetelco con la de Teziutlán; después se transitó por el Libramiento Oriente de la ciudad de Teziutlán que comunica al Km 5 la Carretera Federal Teziutlán-Perote con el Km 5 de la Carretera Federal Teziutlán- Nautla.
- 3- En la última etapa del levantamiento de datos se trabajó del Km 0 al Km 20 de la Carretera Federal N° 129 Teziutlán-Nautla al noreste del área de estudio. Al concluir con este tramo se continuó con un ramal de esta misma que comunica a la cabecera municipal de Hueytamalco. Finalmente el trabajo de campo se concluyó con el recorrido de la Autopista Puebla-Teziutlán, a partir del Km 132 al oeste de la Ciudad de Teziutlán al Km 111, localizado al sureste de la cabecera municipal de Zaragoza.

En el trabajo de campo se obtuvieron un total de 94 puntos que corresponden 54 a PRM que se identificaron y 40 a zonas potenciales. Las zonas potenciales se determinaron de acuerdo a los síntomas que presenta una ladera inestable tales como fisuras, inclinación de árboles y desprendimiento de pequeños fragmentos de suelo y roca.

2.3.3 Percepción Remota

La “percepción remota (PR)” o “teledetección espacial”, se define como la ciencia o arte de adquirir información de un objeto, sin estar en contacto directo con él (Lindenlaub, 1976); pero para ser más específico de acuerdo al objeto de estudio de este trabajo, es una técnica aplicada (Chuvieco, 1990) que consiste en la observación remota de la superficie de la Tierra y los

elementos que se encuentran en ella por medio de algún sensor que detecta la energía electromagnética en sus diferentes intervalos y esta información se representa por medio de fotografías aéreas e imágenes de satélite.

La percepción remota funciona gracias a diversos elementos entre los cuales son de gran importancia los siguientes:

- a) Fuente de energía. Se refiere al origen del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo a sensor, sin embargo la fuente de energía más importante es la energía solar.
- b) Cubierta terrestre. Se conforma por distintas masas de vegetación, suelos, cuerpos de agua, construcciones humanas, que reciben la señal energética proveniente de la fuente de energía, y la reflejan de acuerdo a sus características físicas.
- c) Sistema sensor. Compuesto por el sensor y la plataforma que lo sustenta, tiene como objetivo captar la energía procedente de las cubiertas terrestres, codificarla, grabarla y enviarla directamente a un sistema de recepción.
- d) Sistema de recepción-comercialización. Es donde se recibe la información transmitida por la plataforma se guarda en un formato adecuado (normalmente en forma de imágenes digitales), y tras oportunas correcciones, se distribuya a los intérpretes.
- e) Intérprete. Es quien analiza la información y la convierte en una clave temática o cuantitativa, orientada para facilitar el estudio y la evaluación de un problema.
- f) Usuario final. Es el encargado de analizar el documento final de la interpretación, así como dictaminar sobre las consecuencias que de este se deriven.

La identificación de los PRM con la técnica de la PR, se realizó con el uso del software *Google Earth*. Este programa permite visualizar cualquier punto de la superficie terrestre por medio de un mosaico de diversas imágenes de satélite, entre las que destacan las de *Digital Globe/Geo Eye*; estas nos ofrecen una resolución espacial de 2.44 m en las imágenes multiespectrales y de 60 cm en las pancromáticas. Actualmente estas son las imágenes de satélite comerciales con mayor resolución y precisión (Figura 2.12).

Con el uso de estos materiales se identificaron 30 PRM y se corroboraron 42 puntos que indican los PRM que ocurrieron en octubre de 1999 y corresponden a una base de datos generada por personal de Protección Civil del Estado de Puebla.

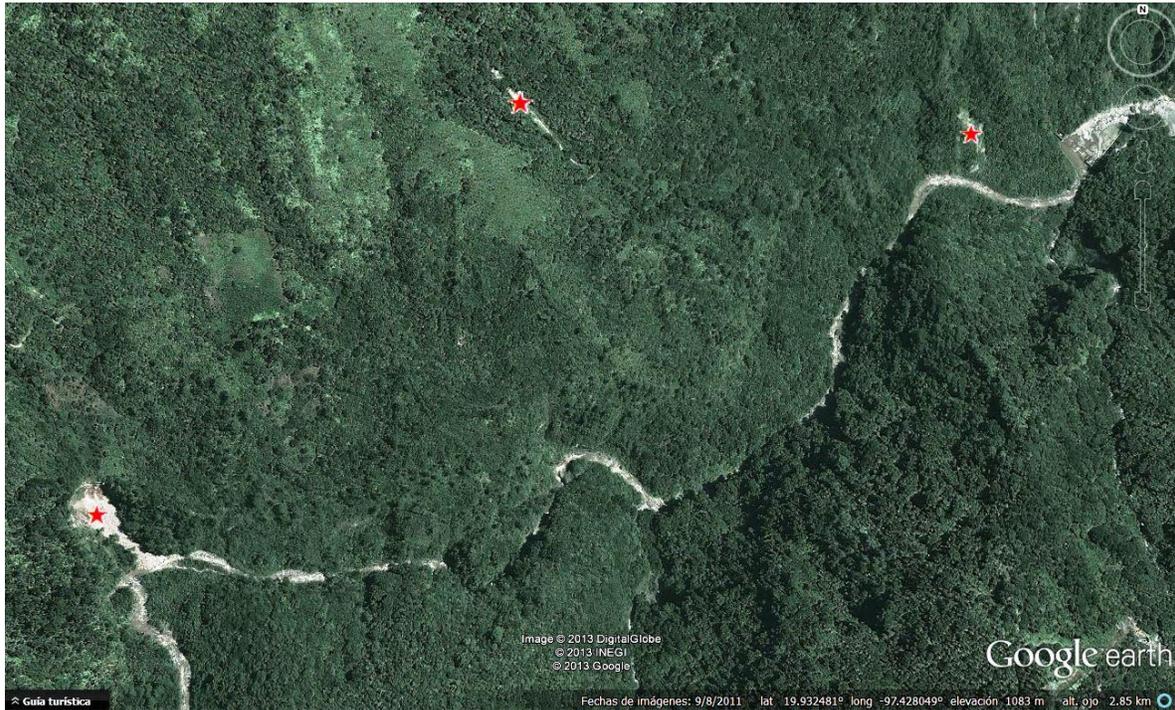


Figura 2.12: Identificación de PRM a través del mosaico de imágenes de satélite Digital Globe en el software Google Earth.

2.3.4 Construcción de la base de datos espacial

La base de datos espacial se realizó introduciendo en el software ArcGis los 94 puntos que se levantaron en campo, los 30 que se identificaron por medio de percepción remota y los 42 proporcionados por Protección Civil del Estado; así se obtuvo una base de datos conformada por 126 procesos de remoción en masa y 40 zonas potenciales a que estos ocurran (Figura 2.13). Después de introducir los datos en el software, se agregó la información que se levantó por medio de las fichas de campo y las observaciones realizadas mediante las imágenes de satélite; dicha información indica las características cualitativas de cada proceso.

Los datos de cada PRM representados en una tabla (Figura 2.14) y vinculados con su respectiva localización y distribución, son los siguientes:

- a) Identificador único: Se refiere a una clave numérica exclusiva para cada dato.
- b) Nombre: A cada proceso se le asignó un nombre de acuerdo al nombre de la localidad más cercana, cuando había más de 2 procesos en una misma localidad se le agregó un número adicional al mismo nombre.
- c) Municipio: Con el uso del Marco Geoestadístico municipal de INEGI (2010) se corroboró la unidad político-administrativa a la que pertenece el proceso, siendo el municipio de Teziutlán (53 puntos) y Tlatlauquitepec (45 puntos), los de mayor frecuencia.
- d) Carretera: Cada dato contiene el nombre del tramo carretero al que pertenece, en el caso de los procesos que se encontraban alejados de alguno de estos se les asignaba la leyenda “ninguno”.
- e) Kilómetro: Para que los datos sean más precisos en cuestión de localización en los tramos carreteros se agregó este elemento.
- f) Tipo de PRM: De acuerdo con la clasificación propuesta por el Programa EPOCH (1993), se determinó el tipo proceso.
- g) Tipo de pendiente: De acuerdo con el trabajo realizado por Alcántara-Ayala y Murillo-García (2008) se agregó el tipo de perfil de pendiente (convexa, cóncava, recta, compleja, vertical y en corte) donde ocurrió el proceso.
- h) Coordenadas: La localización exacta del proceso se determinó por medio del GPS y los programas *Arc Map* y *Google Earth* que forman parte de un SIG; la localización está representada en coordenadas geográficas y metros (UTM Zona 14 N).
- i) Características físicas correspondientes a las capas base: En la base de datos se agregaron 8 columnas que representan los valores o tipos de variables representadas en las capas base (litología, tipo de suelo, uso del suelo, pendiente, profundidad de disección, densidad de disección, orientación de la ladera y geometría del relieve) en donde se encuentra cada proceso de remoción.

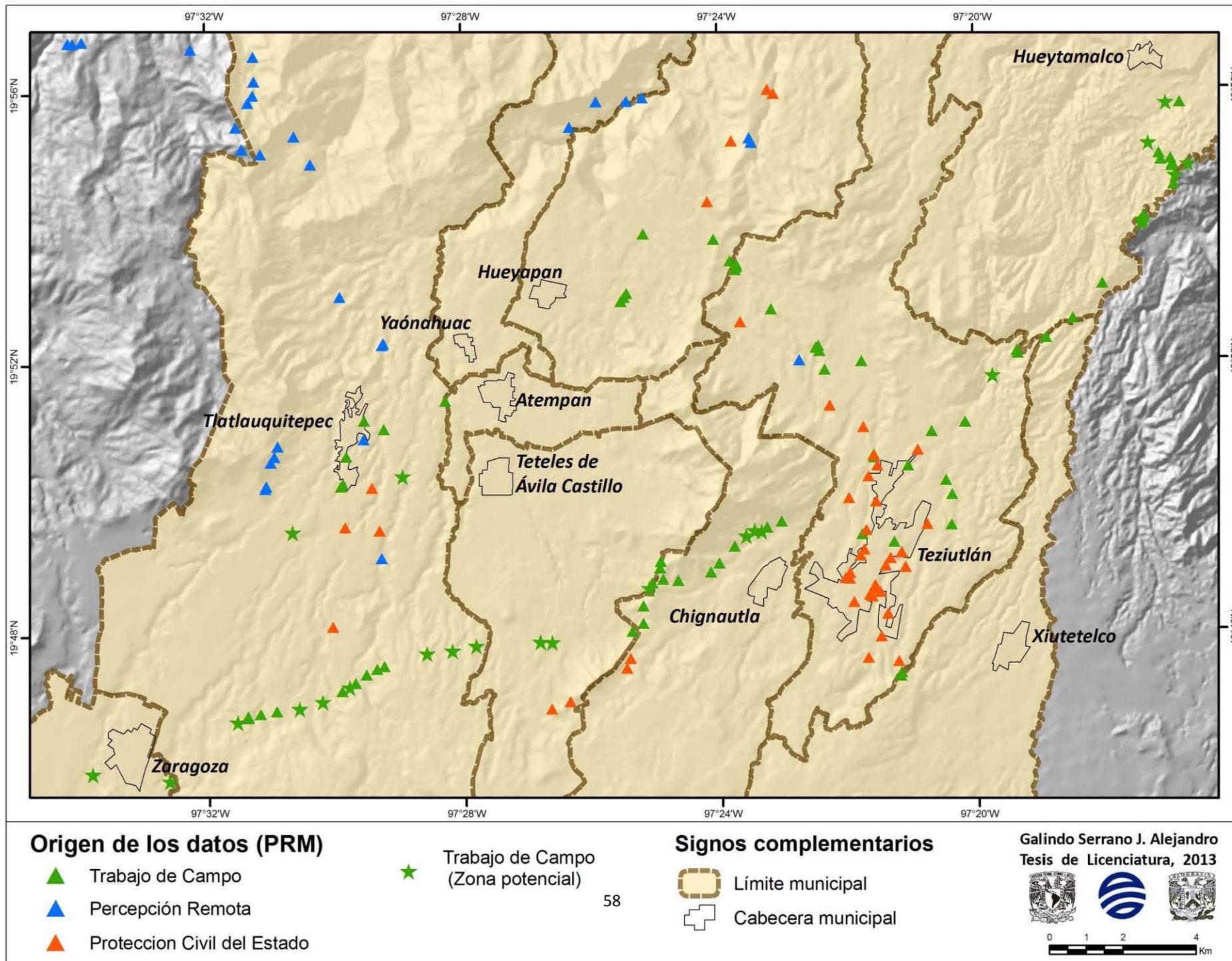


Figura 2.13: Procesos de remoción en masa.

FID	Shape*	NOMBRE	MUNICIPIO	CARRETERA	KM	TIPO_PRM	Tipo_Slope	X	Y	LONGITUD	LATITUD
0	Point	Limonateno 2	Hueytlamalco	Ent. Carr. Fed. Teziutlan-Nautla/Rama a Hueytlamalco	2	Deslizamiento	Concava	67918	220348	-97.288111	19.919528
1	Point	Limonateno 2	Hueytlamalco	Ent. Carr. Fed. Teziutlan-Nautla/Rama a Hueytlamalco	0	Deslizamiento	Concava	67985	220293	-97.281796	19.914499
2	Point	Ateta	Chignautla	Aut. Puebla-Teziutlan	131	Deslizamiento	Concava	66883	219299	-97.387874	19.8257
3	Point	Ateta 2	Chignautla	Aut. Puebla-Teziutlan	131	Zona potencial	Corte	66868	219288	-97.389399	19.824654
4	Point	Ateta 3	Chignautla	Aut. Puebla-Teziutlan	131	Zona potencial	Corte	66848	219289	-97.391224	19.82479
5	Point	Ateta 4	Chignautla	Aut. Puebla-Teziutlan	130	Zona potencial	Corte	66826	219275	-97.393419	19.823564
6	Point	Analco 2	Chignautla	Aut. Puebla-Teziutlan	129	Deslizamiento	Concava	66753	219202	-97.400437	19.816963
7	Point	Km 128	Chignautla	Aut. Puebla-Teziutlan	128	Caída	Corte	66641	219154	-97.411189	19.81279
8	Point	Coahuixco	Chignautla	Aut. Puebla-Teziutlan	127	Deslizamiento	Concava	66601	219158	-97.414991	19.813138
9	Point	Km 127	Atempan	Aut. Puebla-Teziutlan	127	Deslizamiento	Concava	66570	219147	-97.417898	19.812233
10	Point	Km 127 2	Atempan	Aut. Puebla-Teziutlan	127	Zona potencial	Recta	66561	219132	-97.418758	19.810867
11	Point	Unidad Los Cables	Chignautla	Aut. Puebla-Teziutlan	126	Caída	Compleja	66547	219085	-97.420206	19.806625
12	Point	Unidad Los Cables 2	Chignautla	Aut. Puebla-Teziutlan	126	Deslizamiento	Concava	66547	219037	-97.420247	19.802275
13	Point	Coatzala Km 125	Atempan	Aut. Puebla-Teziutlan	125	Caída	Vertical	66516	219015	-97.423162	19.800356
14	Point	Apatauyan	Atempan	Aut. Puebla-Teziutlan	123	Zona potencial	Corte	66298	218984	-97.444057	19.797727
15	Point	Apatauyan 2	Atempan	Aut. Puebla-Teziutlan	123	Zona potencial	Corte	66265	218986	-97.447159	19.797914
16	Point	Tanhuixco del Carmen	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	121	Zona potencial	Corte	66091	218974	-97.46384	19.796991
17	Point	Tanhuixco del Carmen 2	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	121	Zona potencial	Corte	66026	218961	-97.470035	19.795837
18	Point	Pablogoc	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	120	Zona potencial	Corte	65956	218953	-97.47666	19.795219
19	Point	Tepeteno de Iturbide	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	119	Deslizamiento	Concava	65821	218911	-97.489593	19.791534
20	Point	Tepeteno de Iturbide 2	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	119	Caída	Vertical	65840	218920	-97.487755	19.792255
21	Point	Tepeteno de Iturbide 3	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	118	Caída	Compleja	65792	218897	-97.492406	19.790216
22	Point	Gómez Oriente	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	118	Deslizamiento	Concava	65762	218873	-97.495271	19.788125
23	Point	Gómez Oriente 2	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	118	Zona potencial	Compleja	65746	218861	-97.496788	19.787033
24	Point	Tepeteno de Iturbide 3	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	118	Deslizamiento	Concava	65727	218852	-97.498672	19.786195
25	Point	Xococuautila	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	117	Zona potencial	Corte	65673	218821	-97.503857	19.78351
26	Point	Xococuautila 2	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	116	Zona potencial	Compleja	65609	218803	-97.509919	19.781878
27	Point	Xococuautila 3	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	116	Caída	Vertical	65548	218796	-97.515745	19.781367
28	Point	Xococuautila 4	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	115	Deslizamiento	Concava	65504	218789	-97.519996	19.780729
29	Point	Xococuautila 5	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	114	Zona potencial	Corte	65441	218765	-97.525993	19.778623
30	Point	Caseta Km 112	Zaragoza	Aut. Puebla-Teziutlan	112	Zona potencial	Corte	65257	218605	-97.543747	19.764288
31	Point	Porvenir	Zaragoza	Carr. Fed. Amozoc-Teziutlán	114	Caída	Compleja	65019	218516	-97.566466	19.756421
32	Point	El Mohón	Jalacingo	Carr. Fed. Teziutlan-Nautla	20	Zona potencial	Corte	68026	220291	-97.277833	19.914241
33	Point	Cruz Verde	Hueytlamalco	Carr. Fed. Teziutlan-Nautla	17	Deslizamiento	Concava	67906	220152	-97.28941	19.918085
34	Point	Cruz Verde 2	Hueytlamalco	Carr. Fed. Teziutlan-Nautla	0	Zona potencial	Vertical	67902	220129	-97.289878	19.899728
35	Point	El Milagro	Hueytlamalco	Carr. Fed. Teziutlan-Nautla	12	Deslizamiento	Concava	67714	219872	-97.308086	19.876667
36	Point	San Miguel Capulines	Teziutlán	Carr. Fed. Teziutlan-Nautla	8	Zona potencial	Corte	67496	219714	-97.329043	19.86262
37	Point	San Miguel Capulines Km 10	Hueytlamalco	Carr. Fed. Teziutlan-Nautla	10	Deslizamiento	Concava	67564	219783	-97.322492	19.868786
38	Point	San Miguel Capulines 2	Teziutlán	Carr. Fed. Teziutlan-Nautla	7	Zona potencial	Convexa	67422	219588	-97.336207	19.851254
39	Point	Mexcalcuautla	Teziutlán	Carr. Est. Teziutlan-Aire Libre	7	Caída	Vertical	67015	219789	-97.374891	19.869822
40	Point	Ocotepc	Yaonáhuac	Ninguna	0	Deslizamiento	Concava	66342	220388	-97.438578	19.924478
41	Point	Xucayucan	Yaonáhuac	Ninguna	0	Deslizamiento	Concava	66498	220458	-97.423621	19.930681
42	Point	Xucayucan 2	Yaonáhuac	Ninguna	0	Flujo	Concava	66416	220457	-97.431489	19.930649
43	Point	Xococuautila 6	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	115	Deslizamiento	Concava	65471	218778	-97.523133	19.779749
44	Point	La Aurora	Teziutlán	Carr. Fed. Teziutlan-Nautla	2	Deslizamiento	Concava	67250	219232	-97.352925	19.819314
45	Point	San Andres	Teziutlán	Ninguna	0	Deslizamiento	Concava	67267	219468	-97.351126	19.840625
46	Point	El Carmen Iltá	Tlatlaucatepec	Carr. Fed. Amozoc-Teziutlán	133	Zona potencial	Compleja	65889	219436	-97.482661	19.838828
47	Point	Xococuautila 7	Tlatlaucatepec	Aut. Puebla-Teziutlan	115	Deslizamiento	Concava	65470	218782	-97.523241	19.780132
48	Point	Tetellilla	Hueytlamalco	Camino rural	0	Flujo	Concava	66833	220359	-97.391754	19.92147

Figura 2.14: Base de datos del inventario de PRM.

2.4 Metodologías para determinar la susceptibilidad a PRM

Como ya se mencionó al inicio del capítulo, en este trabajo se aplicaron 2 metodologías para conocer la susceptibilidad a la ocurrencia de PRM en determinado territorio: el análisis multicriterio y pesos de evidencia.

2.4.1 El análisis multicriterio.

El análisis multicriterio es una herramienta de análisis en la toma de decisiones que ha sido desarrollado y empleado desde la década de los sesenta. Este considera la influencia de diversos parámetros simultáneamente sobre un proceso o fenómeno en forma numérica, tomando en

Una vez concluidas las entrevistas, los resultados se capturaron en una tabla del programa Microsoft Excel (Figura 2.17); en este se determinaron los promedios de cada factor en cada una de las encuestas, después se calculó el peso específico (Figura 2.18). El proceso de asignación de pesos considera que la problemática tiene un valor igual a 1, los valores de peso deben de estar entre 0 y 1, la suma total de los valores debe ser 1 (Caloni, 2010). Posteriormente se generó una tabla en la cual se integraron los promedios de cada encuesta y nuevamente se obtuvieron los promedios para obtener el peso específico de cada factor el cual se puede representar en porcentaje (Figura 2.19).

De acuerdo con los resultados obtenidos por la opinión de los especialistas encuestados con base en el análisis multicriterio, la geología (26.7%) y la pendiente (25.5%) son los parámetros que más influyen en la inestabilidad de laderas en la zona de estudio; la densidad de disección (11.9 %) y la profundidad de disección (11%) tienen una influencia media en la ocurrencia de PRM y la geometría del relieve (8.9%), el uso del suelo (6.4%), la orientación de la ladera (5.9%) y el tipo de suelo (4.4%) son de menor influencia.

Las clases o unidades de cada parámetro o capa de información se agruparon en 3 categorías con base en su influencia en la inestabilidad del terreno, estas categorías son alta (1), media (0), y baja (-1). La asignación de los rangos en el tipo de rocas se realizó de acuerdo a las características físicas de cada tipo, tales como dureza, porosidad o presencia de fracturas (Pérez-Rojas *et al.*, 2006) y al número que PRM que han ocurrido en determinadas unidades litológicas. Los rangos de los parámetros morfométricos que son la pendiente, la densidad de disección y la profundidad de disección se agruparon gradualmente al incremento de los valores de los mismos. Las unidades de uso de suelo se agruparon en categoría baja en donde hay presencia de la cubierta forestal y en categoría alta donde no hay presencia de cubierta y los suelos son desnudos. Las unidades de suelo se agruparon al igual que el tipo de roca por las características físicas de los suelos y al número de PRM que se encontraban en cada unidad. Las unidades de la geometría del relieve y la orientación de las laderas se categorizaron de acuerdo a las observaciones directas de campo.

Posterior a la clasificación de las unidades de cada capa de información, se procedió a realizar la suma de todas las capas de información. Se añadió la influencia de la inestabilidad de laderas de cada clase tomando en cuenta el peso específico de cada capa. Esta operación fue realizada en el software *ArcGis* y finalmente se obtuvo el mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en

masa (Figura 2.20), a través del cual los resultados se expresaron en 5 rangos que indican susceptibilidad muy baja, baja, media, alta y muy alta.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Especialista 1	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera
2	Geología	1	7	7	4	6	4	2	7
3	Edafología	1/7	1	1/6	1/7	1/7	1/7	1/7	1
4	Uso del Suelo	1/7	6	1	1/7	1/7	1/7	1/7	4
5	Pendiente	1/4	7	7	1	6	4	4	7
6	Profundidad de disección	1/6	7	7	1/6	1	1/5	6	7
7	Densidad de disección	1/4	7	7	1/4	5	1	6	7
8	Geometría del relieve	1/2	7	7	1/4	1/6	1/6	1	7
9	Orientación de la ladera	1/7	1	1/4	1/7	1/7	1/7	1/7	1
10		2.595238095	43	36.41666667	6.0952381	18.5952381	9.795238095	19.42857143	41
11									
12	Especialista 2	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera
13	Geología	1	8	8	5	7	7	7	8
14	Edafología	1/8	1	1/4	1/8	1/4	3	1/3	1
15	Uso del Suelo	1/8	4	1	1/7	4	4	1	4
16	Pendiente	1/5	8	7	1	7	7	6	8
17	Profundidad de disección	1/7	4	1/4	1/7	1	1	4	3
18	Densidad de disección	1/7	1/3	1/4	1/7	1	1	4	2
19	Geometría del relieve	1/7	3	1	1/6	1/4	1/4	1	4
20	Orientación de la ladera	1/8	1	1/4	1/8	1/2	1/2	1/4	1
21		2.003571429	29.3333333	18	6.8452381	21	23.75	23.58333333	31
22									
23	Especialista 3	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera
24	Geología	1	5	3	1/2	3	2	5	7
25	Edafología	1/5	1	1/3	1/5	1/3	1/4	1	3
26	Uso del Suelo	1/3	3	1	1/5	1	1/2	3	4
27	Pendiente	2	5	5	1	4	3	6	8
28	Profundidad de disección	1/3	3	1	1/4	1	1/2	3	4
29	Densidad de disección	1/2	4	2	1/3	2	1	3	5
30	Geometría del relieve	1/5	1	1/3	1/6	1/3	1/3	1	2
31	Orientación de la ladera	1/7	1/3	1/4	1/8	1/4	1/5	1/2	1
32		4.70952381	22.3333333	12.91666667	2.775	11.91666667	7.783333333	22.5	34
33									
34	Especialista 4	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera
35	Geología	1	5	5	1/2	3	3	4	6
36	Edafología	1/5	1	2	1/3	1/2	1/3	1/2	3
37	Uso del Suelo	1/5	1/2	1	1/3	1/3	1/3	1/3	3
38	Pendiente	2	3	3	1	3	3	4	5
39	Profundidad de disección	1/3	2	3	1/3	1	1/2	3	3
40	Densidad de disección	1/3	3	3	1/3	2	1	3	4
41	Geometría del relieve	1/4	2	3	1/4	1/3	1/3	1	3
42	Orientación de la ladera	1/6	1/3	1/3	1/5	1/3	1/4	1/3	1
43		4.483333333	16.8333333	20.33333333	3.283333333	10.5	8.75	16.16666667	28
44									
45	Especialista 5	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera
46	Geología	1	1/4	3	1/3	5	6	6	1/6
47	Edafología	4	1	1/2	1/6	1/3	1/3	1/6	1/7
48	Uso del Suelo	1/3	2	1	1/5	1/3	1/6	1/4	3
49	Pendiente	3	6	5	1	1	5	1/2	4
50	Profundidad de disección	1/5	3	3	1	1	1/3	1/5	1/6
51	Densidad de disección	1/6	3	6	1/5	3	1	1/6	1/7
52	Geometría del relieve	1/6	6	4	2	5	6	1	1/3
53	Orientación de la ladera	6	7	1/3	1/4	6	7	3	1
54		14.86666667	28.25	22.83333333	5.15	21.66666667	25.83333333	11.28333333	8.952380952
55									
56	Especialista 6	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera
57	Geología	1	4	4	4	5	5	4	6
58	Edafología	1/4	1	6	1/7	1/6	1/7	1/5	1/5
59	Uso del Suelo	1/4	1/6	1	1/8	1/7	1/7	1/5	1/4
60	Pendiente	1/4	7	8	1	8	8	8	8
61	Profundidad de disección	1/5	6	7	1/8	1	2	5	7
62	Densidad de disección	1/5	7	7	1/8	1/2	1	7	8
63	Geometría del relieve	1/4	5	5	1/8	1/5	1/7	1	7
64	Orientación de la ladera	1/6	5	4	1/8	1/7	1/8	1/7	1
65		2.566666667	35.1666667	42	5.76785714	15.15238095	16.55357143	25.54285714	37.45

Figura 2.17: Resultados de encuestas aplicadas a especialistas.

	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	Especialista 1	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera	PROMEDIO
2	Geología	0.385321101	0.162790698	0.19221968	0.65625	0.322663252	0.408361692	0.102941176	0.170731707	0.300159913
3	Edafología	0.055045872	0.023255814	0.004576659	0.0234375	0.007682458	0.014584346	0.007352941	0.024390244	0.02040729
4	Uso del Suelo	0.055045872	0.139534884	0.027459954	0.0234375	0.007682458	0.014584346	0.007352941	0.097560976	0.046582366
5	Pendiente	0.096330275	0.162790698	0.19221968	0.1640625	0.322663252	0.408361692	0.205882353	0.170731707	0.21538027
6	Profundidad de disección	0.064220183	0.162790698	0.19221968	0.02734375	0.053772709	0.020418085	0.308823529	0.170731707	0.125040605
7	Densidad de disección	0.096330275	0.162790698	0.19221968	0.041015625	0.268886044	0.102090423	0.308823529	0.170731707	0.167860998
8	Geometría del relieve	0.19266055	0.162790698	0.19221968	0.041015625	0.008962868	0.01701507	0.051470588	0.170731707	0.104608348
9	Orientación de la ladera	0.055045872	0.023255814	0.006864989	0.0234375	0.007682458	0.014584346	0.007352941	0.024390244	0.02032677
10		1	1	1	1	1	1	1	1	1
11										
12	Especialista 2	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera	PROMEDIO
13	Geología	0.499108734	0.272727273	0.444444444	0.730434783	0.333333333	0.294736842	0.296819788	0.258064516	0.391208714
14	Edafología	0.062388592	0.034090909	0.013888889	0.01826087	0.011904762	0.126315789	0.014134276	0.032258065	0.039155269
15	Uso del Suelo	0.062388592	0.136363636	0.055555556	0.020869565	0.19047619	0.168421053	0.042402827	0.129032258	0.10068871
16	Pendiente	0.099821747	0.272727273	0.388888889	0.146086957	0.333333333	0.294736842	0.254416961	0.258064516	0.256099565
17	Profundidad de disección	0.071301248	0.136363636	0.013888889	0.020869565	0.047619048	0.042105263	0.169611307	0.096774194	0.074816644
18	Densidad de disección	0.071301248	0.011363636	0.013888889	0.020869565	0.047619048	0.042105263	0.169611307	0.064516129	0.055159386
19	Geometría del relieve	0.071301248	0.102272727	0.055555556	0.024347826	0.011904762	0.010526316	0.042402827	0.129032258	0.05591794
20	Orientación de la ladera	0.062388592	0.034090909	0.013888889	0.01826087	0.023809524	0.021052632	0.010600707	0.032258065	0.027043773
21		1	1	1	1	1	1	1	1	1
22										
23	Especialista 3	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera	PROMEDIO
24	Geología	0.212335693	0.223880597	0.232258065	0.18018018	0.251748252	0.256959315	0.222222222	0.205882353	0.223183335
25	Edafología	0.042467139	0.044776119	0.025806452	0.072072072	0.027972028	0.032119914	0.044444444	0.088235294	0.047236683
26	Uso del Suelo	0.070778564	0.134328358	0.077419355	0.072072072	0.083916084	0.064239829	0.133333333	0.117647059	0.094216832
27	Pendiente	0.424671385	0.223880597	0.387096774	0.36036036	0.335664336	0.385438972	0.266666667	0.235294118	0.327384151
28	Profundidad de disección	0.070778564	0.134328358	0.077419355	0.090090909	0.083916084	0.064239829	0.133333333	0.117647059	0.096469084
29	Densidad de disección	0.106167846	0.179104478	0.15483871	0.12012012	0.167832168	0.128479657	0.133333333	0.147058824	0.142116892
30	Geometría del relieve	0.042467139	0.044776119	0.025806452	0.06006006	0.027972028	0.042826552	0.044444444	0.058823529	0.04339704
31	Orientación de la ladera	0.03033367	0.014925373	0.019354839	0.045045045	0.020979021	0.025695931	0.022222222	0.029411765	0.025995983
32		1	1	1	1	1	1	1	1	1
33										
34	Especialista 4	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera	PROMEDIO
35	Geología	0.223048327	0.297029703	0.245901639	0.152284264	0.285714286	0.342857143	0.24742268	0.214285714	0.25106797
36	Edafología	0.044609665	0.059405941	0.098360656	0.101522843	0.047619048	0.038095238	0.030927835	0.107142857	0.06596051
37	Uso del Suelo	0.044609665	0.02970297	0.049180328	0.101522843	0.031746032	0.038095238	0.020618557	0.107142857	0.052827311
38	Pendiente	0.446096654	0.178217822	0.147540984	0.304568528	0.285714286	0.342857143	0.24742268	0.178571429	0.266373691
39	Profundidad de disección	0.074349442	0.118811881	0.147540984	0.101522843	0.095238095	0.057142857	0.18556701	0.107142857	0.110914496
40	Densidad de disección	0.074349442	0.178217822	0.147540984	0.101522843	0.19047619	0.114285714	0.18556701	0.142857143	0.141852144
41	Geometría del relieve	0.055762082	0.118811881	0.147540984	0.076142132	0.031746032	0.038095238	0.06185567	0.107142857	0.079637109
42	Orientación de la ladera	0.037174721	0.01980198	0.016393443	0.060913706	0.031746032	0.028571429	0.020618557	0.035714286	0.031366769
43		1	1	1	1	1	1	1	1	1
44										
45	Especialista 5	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera	PROMEDIO
46	Geología	0.067264574	0.008849558	0.131386861	0.064724919	0.230769231	0.232258065	0.531757755	0.018617021	0.160703498
47	Edafología	0.269058296	0.03539823	0.02189781	0.03236246	0.015384615	0.012903226	0.014771049	0.015957447	0.052216642
48	Uso del Suelo	0.022421525	0.07079646	0.04379562	0.038834951	0.015384615	0.006451613	0.022156573	0.335106383	0.069368468
49	Pendiente	0.201793722	0.212389381	0.218978102	0.194174757	0.046153846	0.193548387	0.044313146	0.446808511	0.194769982
50	Profundidad de disección	0.013452915	0.10619469	0.131386861	0.194174757	0.046153846	0.012903226	0.017725258	0.018617021	0.067576072
51	Densidad de disección	0.011210762	0.10619469	0.262773723	0.038834951	0.138461538	0.038709677	0.014771049	0.015957447	0.078362423
52	Geometría del relieve	0.011210762	0.212389381	0.175182482	0.388349515	0.230769231	0.232258065	0.088626292	0.037234043	0.172002471
53	Orientación de la ladera	0.403587444	0.247787611	0.01459854	0.048543689	0.276923077	0.270967742	0.265878877	0.111702128	0.204998638
54		1	1	1	1	1	1	1	1	1
55										
56	Especialista 6	Geología	Edafología	Uso del Suelo	Pendiente	Profundidad de disección	Densidad de disección	Geometría del relieve	Orientación de la ladera	PROMEDIO
57	Geología	0.38961039	0.113744076	0.095238095	0.693498452	0.32981144	0.302049622	0.156599553	0.160213618	0.280116869
58	Edafología	0.097402597	0.028436019	0.142857143	0.024767802	0.010999371	0.008629989	0.007829978	0.005340454	0.040782919
59	Uso del Suelo	0.097402597	0.004739336	0.023809524	0.021671827	0.009428033	0.008629989	0.007829978	0.006675567	0.022523356
60	Pendiente	0.097402597	0.199052133	0.19047619	0.173374613	0.52796983	0.483279396	0.313199105	0.213618158	0.274796503
61	Profundidad de disección	0.077922078	0.170616114	0.166666667	0.021671827	0.065996229	0.120819849	0.195749441	0.186915888	0.125794761
62	Densidad de disección	0.077922078	0.199052133	0.166666667	0.021671827	0.032998114	0.060409924	0.274049217	0.213618158	0.130798515
63	Geometría del relieve	0.097402597	0.142180095	0.119047619	0.021671827	0.013199246	0.008629989	0.039149888	0.186915888	0.078524644
64	Orientación de la ladera	0.064935065	0.142180095	0.095238095	0.021671827	0.009428033	0.007551241	0.005592841	0.02670227	0.046662433
65		1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 2.18: Cálculo de peso específico de cada encuesta.

	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Especialista 4	Especialista 5	Especialista 6	PROMEDIO	PESO ESPECÍFICO
Geología	0.300159913	0.391208714	0.223183335	0.25106797	0.160703498	0.280116869	0.26774005	0.26774005
Edafología	0.020040729	0.039155269	0.047236683	0.06596051	0.052216642	0.040782919	0.04423213	0.044232125
Uso del suelo	0.046582366	0.10068871	0.094216832	0.052827311	0.069368468	0.022523356	0.06436784	0.064367841
Pendiente	0.21538027	0.256009565	0.327384151	0.266373691	0.194769982	0.274796503	0.25578569	0.255785693
Profundidad de disección	0.125040605	0.074816644	0.096469084	0.110914496	0.067576072	0.125794761	0.10010194	0.100101944
Densidad de disección	0.167860998	0.055159386	0.142116892	0.141852144	0.07836423	0.130798515	0.11935869	0.119358694
Geometría del relieve	0.104608348	0.05591794	0.04339704	0.079637109	0.172002471	0.078524644	0.08901459	0.089014592
Orientación de la ladera	0.02032677	0.027043773	0.025995983	0.031366769	0.204998638	0.046662433	0.05939906	0.059399061
	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 2.19: Integración de los resultados de las encuestas para el cálculo del peso específico.

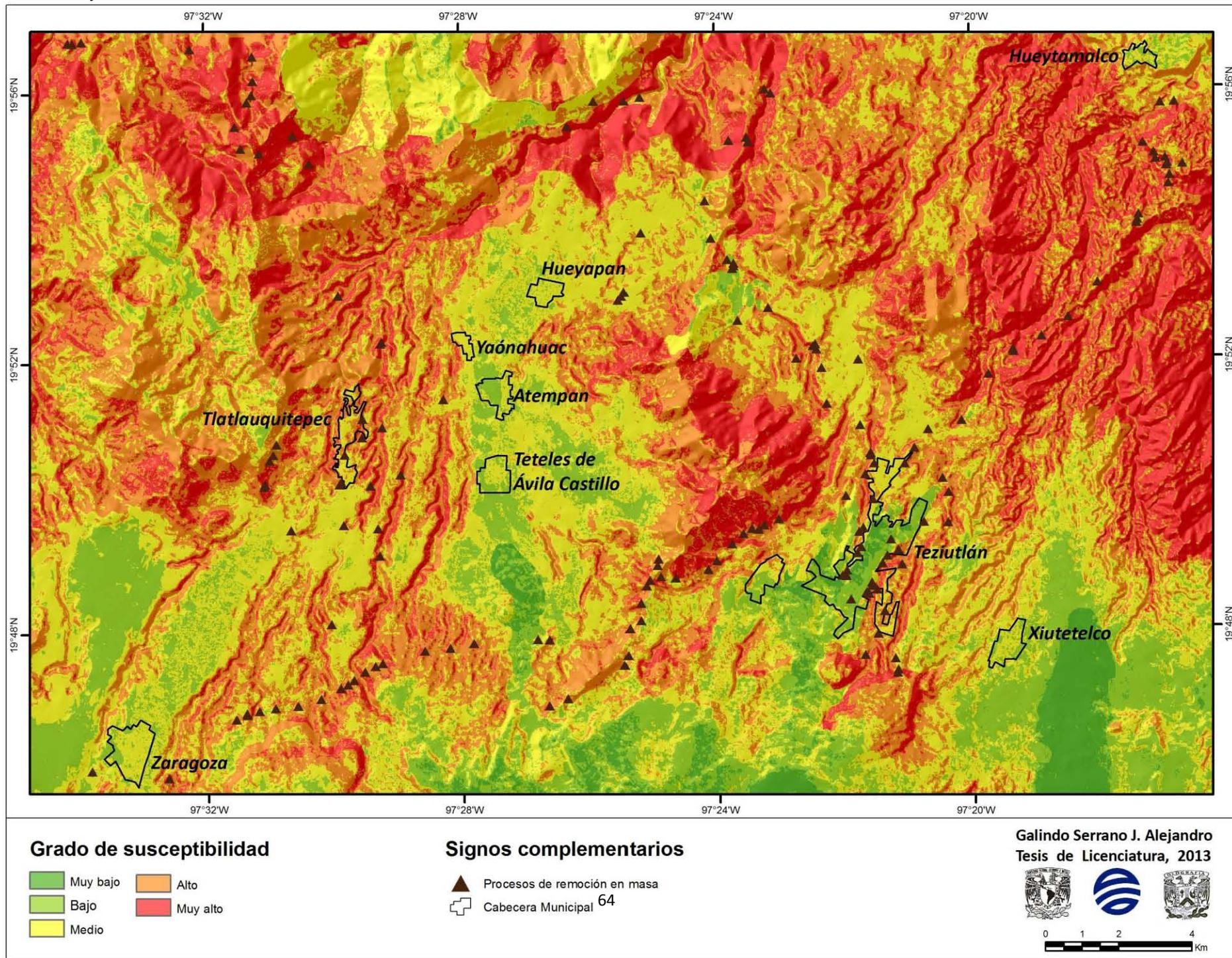


Figura 2.20: Mapa de susceptibilidad a PRM realizado por Análisis Multicriterio.

2.4.2 Pesos de evidencia.

Pesos de evidencia o *Weights of evidence* (WOE) es un método estadístico basado en el teorema de Bayes, el cual expresa la probabilidad previa (incondicional) y la probabilidad posterior (condicional) de que ocurra un evento. Este método es aplicable cuando se dispone de suficientes datos para estimar la importancia relativa de determinados fenómenos a través de medios estadísticos (Bonham-Carter, 1994).

La probabilidad previa de un evento, es determinada por los mismos tipos de eventos que ocurrieron en el pasado durante un periodo de tiempo determinado. Por ejemplo la probabilidad de que ocurra un proceso de ladera en una unidad de área (o pixel) puede ser estimada basándose en la frecuencia con la que los materiales se movieron en el pasado en determinada unidad de área; esto puede ser determinado tomando la relación entre el área o el número total de pixeles donde se presentan PRM y el número total de pixeles del área de estudio.

La probabilidad previa puede ser modificada utilizando cualquier fuente de información o de evidencias, de esta manera puede ser actualizada con la adición de nuevas evidencias de que ha ocurrido un evento o factores, de modo que al agregar una nueva prueba las probabilidades del suceso cambian y se genera una probabilidad condicional denominada "probabilidad posterior". Por ejemplo, si un deslizamiento existe en el área "F" (Figura 2.21), o cualquier unidad ya sea edáfica o litológica, la probabilidad de ocurrencia basándose en dicha área podría cambiar, entonces, una situación favorable para predecir un deslizamiento dada la presencia de evidencias en el área se puede expresar a través la probabilidad condicional (Bonham-Carter, 2002).

La formulación de probabilidades se obtiene relacionando la probabilidad de que un evento ocurra y no ocurra, y se representa por medio de un logaritmo natural de probabilidades, por lo tanto se obtiene un peso de evidencia positivo (W+) que indica la presencia de los elementos de estudio y un peso negativo que indica la ausencia de dichos elementos (W-) (Figura 2.21). Con la diferencia de estos pesos se obtiene un Peso Final para cada unidad o factor de acuerdo a la cantidad de PRM que se presentan.

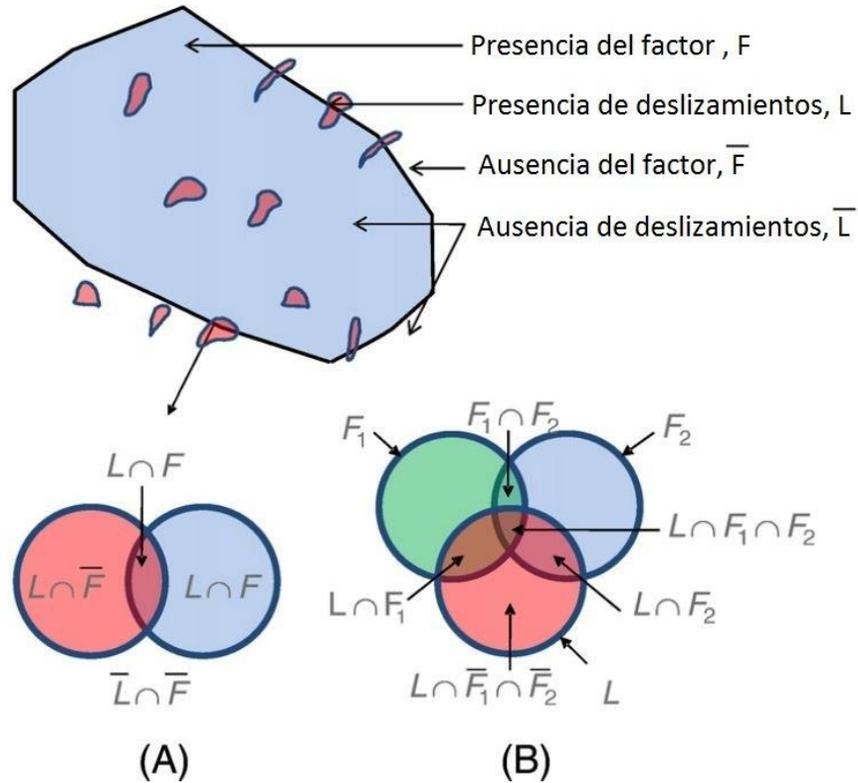


Figura 2.21: Relaciones entre los deslizamientos y los factores utilizados en pesos de evidencia. A) Muestra la presencia y la ausencia de una unidad o factor en relación con un deslizamiento. B) El diagrama muestra la relación de un deslizamiento con dos factores, F1 y F2 (Fuente: Regmi *et al.*, 2010).

Procedimiento

Para llevar a cabo este método se utilizaron las 8 capas de información geográfica en formato raster las cuales fueron elaboradas con anterioridad y el inventario de PRM en formato vectorial. La fórmula para el cálculo del peso positivo y negativo de cada clase o unidad de cada factor fue:

$$(W+) = \log_e \left(\frac{\frac{A_1}{A_1 + A_2}}{\frac{A_3}{A_3 + A_4}} \right) \qquad (W-) = \log_e \left(\frac{\frac{A_2}{A_1 + A_2}}{\frac{A_4}{A_3 + A_4}} \right)$$

En donde:

A1 es el número de procesos de remoción en masa de cada unidad.

A2 es el número total de deslizamientos menos los deslizamientos que caen en cada clase o unidad.

A3 es el número de pixeles de la clase menos el número de deslizamientos que caen en esa clase o unidad.

A4 es el total de pixeles del área en estudio menos la suma de los pixeles de la clase y el número total de deslizamientos.

Log_e es el logaritmo natural.

El número de PRM de cada clase se obtuvo de forma automatizada con el uso del software ArcGis mediante la sobreposición de las capas de información con el inventario, es decir que de cada punto (PRM) se extrajo la clase o unidad a la que pertenecía de cada capa de información. Otros valores fundamentales para realizar las operaciones son el número de pixeles de cada clase o unidad, el número total de PRM que corresponden a 166 y el número total de pixeles de toda el área de estudio, posteriormente estos datos se anotaron en una tabla del programa Excel, misma en la que se realizaron las operaciones para el cálculo del Peso Final (Figura 2.22). En las clases y unidades que tuvieron valor igual a cero en cuanto el número de PRM se anotó el valor 0.00001 debido a que no se puede obtener el logaritmo natural de 0.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Geología													
2	Clase	No de clase	Total PRM	Total pixeles	Pixeles por clase	A1	A2	A3	A4	W+	W-	LN(W+)	LN(W-)	(W+)-(W-)
3	Andesita-Toba Andesítica	1	166	1835748	324441	42								
4	Basalto	2	166	1835748	67080	12								
5	Caliza-Lutita J	3	166	1835748	43679	4								
6	Caliza_Lutita K	4	166	1835748	2443	0.00001								
7	Caliza K	5	166	1835748	56775	2								
8	Riolita-Dacita	6	166	1835748	18392	0.00001								
9	Granito K	7	166	1835748	9197	8								
10	Andesita-Basalto	8	166	1835748	30025	1								
11	Granito J	9	166	1835748	25531	0.00001								
12	Lutita-Arenisca	10	166	1835748	14845	0.00001								
13	Piroclásto T	11	166	1835748	4074	0.00001								
14	Esquisto-Metalava	12	166	1835748	61563	6								
15	Caliza J	13	166	1835748	13798	0.00001								
16	Granidiorita-Pórfido Riolitico	14	166	1835748	14137	0.00001								
17	Limonita-Conglomerado Polimíctico	15	166	1835748	209561	15								
18	Pumicita	16	166	1835748	275968	6								
19	Ignimbrita-Toba Riolitica	17	166	1835748	663863	70								
20	Piroclástico	18	166	1835748	376	0.00001								

Figura 2.22: Tabla para el cálculo de Peso Final de cada unidad litológicas de la capa de Geología.

Una vez obtenidos los pesos finales de cada factor (Figura 2.23), se agregó una nueva columna a la base de datos de cada factor o capa raster y se incorporaron los resultados. Cabe mencionar que cuando el archivo raster no permite la visualización de la base de datos, se tiene que reclasificar el mismo. Finalmente al tener los pesos de cada clase se hace la suma de las capas de información. La capa resultante da valores negativos y positivos; los valores negativos indican que presencia del factor contribuye a la ausencia de los PRM y los valores positivos indican que la presencia del factor contribuye a la presencia de los PRM. En la Figura 2.24 se muestra la frecuencia de los resultados obtenidos, éstos se clasificaron en 5 categorías: muy baja, baja, media, alta y muy alta, siendo los valores cercanos a cero correspondientes a la categoría media. Finalmente se asignan los colores y el formato para tener el mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa (Figura 2.25).

Pendiente														
Clase	No de clase	Total PRM	Total pixeles	Pixeles por clase	A1	A2	A3	A4	W+	W-	LN(W+)	LN(W-)	(W+)-(W-)	
<2	1	166	1835748	158467	6	160	158461	1677275	0.419	1.055	-0.871	0.053	-0.924	
(2-4)	2	166	1835748	239444	15	151	239429	1596289	0.693	1.046	-0.367	0.045	-0.412	
(4-8)	3	166	1835748	345818	29	137	345789	1489901	0.927	1.017	-0.075	0.017	-0.092	
(8-16)	4	166	1835748	467067	47	119	467020	1368634	1.113	0.961	0.107	-0.039	0.146	
(16-32)	5	166	1835748	508482	57	109	508425	1327209	1.240	0.908	0.215	-0.096	0.311	
>32	6	166	1835748	116470	12	154	116458	1719266	1.139	0.991	0.131	-0.009	0.140	

Figura 2.23: Cálculo del Peso Final de cada clase de la capa de pendientes.

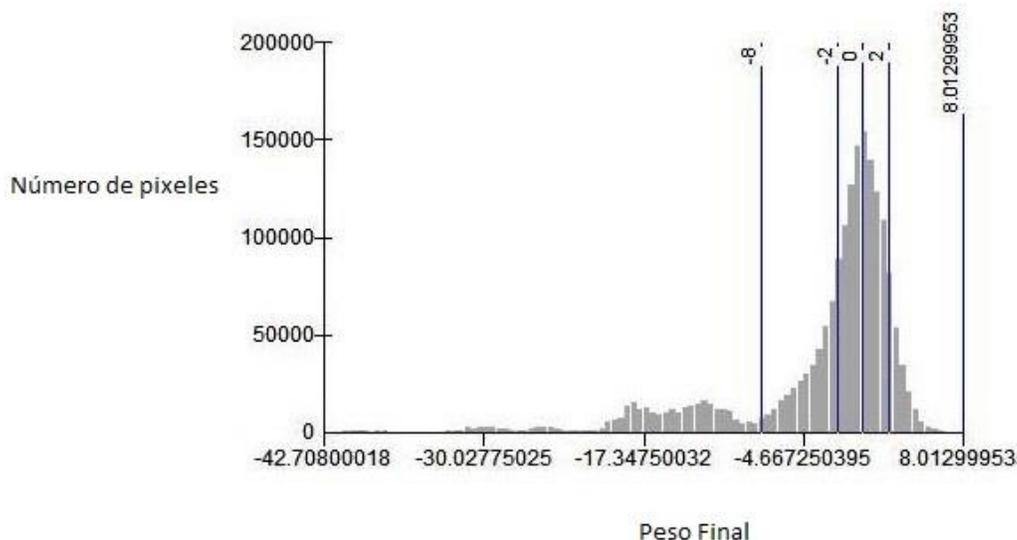


Figura 2.24: Pesos finales asignados a cada pixel.

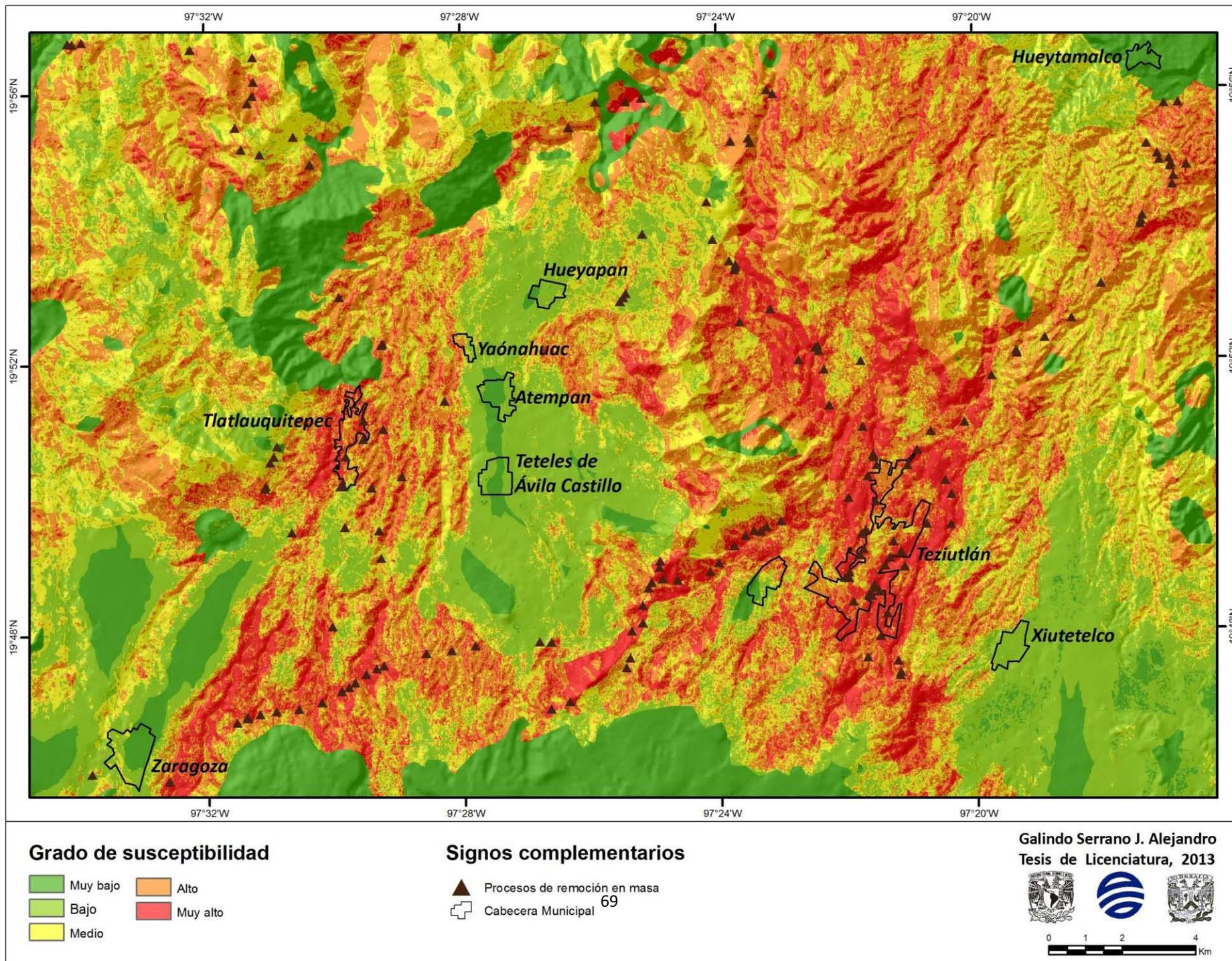


Figura 2.25 Mapa de susceptibilidad a PRM realizado por Pesos de Evidencia.

2.4.3 Análisis y resultados.

De acuerdo con los resultados mostrados en los mapas de susceptibilidad (Figura 2.20 y Figura 2.25), se observan notables diferencias en la zonificación del grado de susceptibilidad a PRM, sin embargo también presentan considerables semejanzas.

Entre las semejanzas destacan que todas las cabeceras municipales con excepción de Tlatlauquitepec y Teziutlán, se encuentran en una zona con bajo grado de susceptibilidad, los barrancos originados por los escurrimientos que cruzan de sur a norte el municipio de Tlatlauquitepec presentan un alto grado de susceptibilidad, mientras que las laderas orientales de la Sierra Chignautla localizada al oeste de la cabecera municipal de Teziutlán presentan alto grado y las planicies que se encuentran al sur del área de estudio presentan bajo grado.

Con respecto a las diferencias más significativas destacan la cabecera municipal de Teziutlán en donde el mapa de pesos de evidencia indica que el sector centro tiene grado de susceptibilidad medio y la periferia de la ciudad se encuentra en rango alto. En el mapa de análisis multicriterio, el centro queda como una zona de bajo grado y la periferia en un grado medio, en donde los barrancos son los únicos marcados con un alto grado. Otra zona sobresaliente es un área que se ubica al noroeste de la cabecera de Tlatlauquitepec que corresponde a las laderas orientales de una serie de elevaciones orientadas de norte a sur. En el análisis multicriterio se expresa con alto grado y muy alto grado en pendientes altas, mientras que en el mapa de pesos de evidencia quedó dentro de la categoría de muy baja susceptibilidad (Figura 2.26). Esta área marcada con muy baja susceptibilidad corresponde a tres unidades litológicas (Granodiorita-pórfido riolítico, granito y lituta-arenisca), en las cuales no se tiene ningún registro o evidencia de PRM en lo que corresponde al área de estudio y su peso negativo es muy significativo.

De manera general en ambos mapas se puede apreciar que las zonas de muy alta susceptibilidad corresponden a zonas con un relieve muy accidentado, mientras que las zonas planas coinciden con zonas de muy baja susceptibilidad.

A pesar de que los mapas muestran resultados variables en la zonificación de la susceptibilidad a PRM, para validar o demostrar la precisión de los resultados, se determinó en que rangos de grado de susceptibilidad quedaron los PRM registrados en el inventario. En el mapa de pesos de evidencia (Figura 2.25) la mayoría de PRM coinciden en zonas de alta susceptibilidad (Figura 2.27),

mientras que en el mapa de análisis multicriterio (Figura 2.20) la mayoría de los PRM coinciden con los rangos de alta y muy alta susceptibilidad (Figura 2.28).

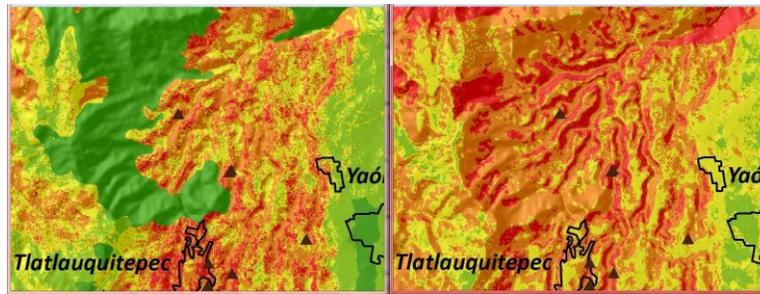


Figura 2.26: Comparación del mapeo de susceptibilidad a PRM por pesos de evidencia (Izquierda) y análisis multicriterio (derecha).



Figura 2.27: Número de PRM por rango en el mapa de susceptibilidad realizado mediante el método de pesos de evidencia.

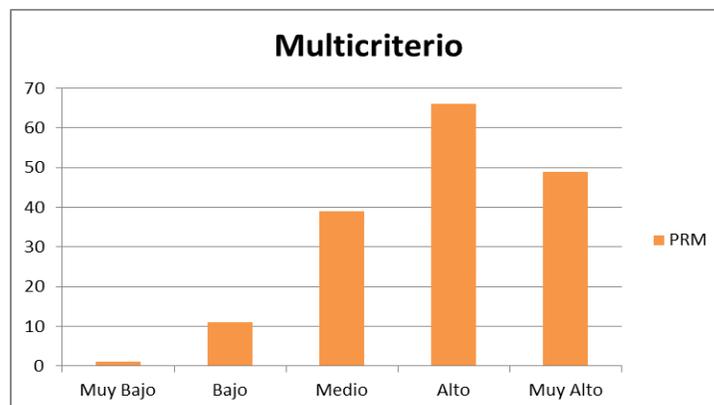


Figura 2.28: Número de PRM por rango en el mapa de susceptibilidad realizado mediante la herramienta del análisis multicriterio.

Dado lo anterior, es necesario mencionar qué en estos métodos se determinan áreas potencialmente afectables a PRM, por lo que la identificación de estas áreas no es una ciencia exacta y se realiza con base en estimaciones. Es importante también destacar que estos resultados son modelos que se aproximan a la realidad, por lo que sin una investigación detallada y un monitoreo, es difícil pronosticar el peligro por PRM en términos absolutos (Preciado, 2007).

Otra forma de validar los resultados de los mapas de susceptibilidad, fue a través de la elaboración de un índice de recurrencia de PRM. El índice se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$Ir = \frac{t}{\Sigma t}$$

En dónde:

Ir = Índice de recurrencia.

$t = pr/a$

pr = Procesos de remoción en masa por rango de susceptibilidad.

a = Área por rango de susceptibilidad (kilómetros cuadrados).

En la Tablas 2.3 y 2.4 se muestran los resultados del índice de recurrencia, los cuales tienen una correlación con la zonificación obtenida y mostrada en los mapas de susceptibilidad.

Tabla 2.3: Cálculo del Índice de recurrencia en pesos de evidencia.

Susceptibilidad	Área Km ²	Área (%)	PRM	PRM (%)	Índice de recurrencia
Muy alto	78.914	10.75	10	6.02	0.138
Alto	203.142	27.66	110	66.27	0.589
Medio	191.7564	26.11	40	24.10	0.227
Bajo	142.9464	19.47	6	3.61	0.046
Muy Bajo	117.5404	16.01	0	0.00	0.000
Total	734.2992	100	166	100	1

Tabla 2.4: Cálculo del Índice de recurrencia en análisis multicriterio.

Susceptibilidad	Área Km ²	Área (%)	PRM	PRM (%)	Índice de recurrencia
Muy alto	24.4764	3.33	49	29.518	0.679
Alto	91.8332	12.51	66	39.759	0.244
Medio	222.6788	30.33	39	23.494	0.059
Bajo	250.7688	34.15	11	6.627	0.015
Muy Bajo	144.542	19.68	1	0.602	0.002
Total	734.2992	100	166	100	1

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 2.3, correspondiente al mapa de susceptibilidad a PRM realizado por medio del método de pesos de evidencia (Figura 2.25), el 72.28% del total de PRM se presentaron en los rangos de alta y muy alta susceptibilidad, el 24.1% en áreas de susceptibilidad media y el 3.6% en el rango de bajo. Con respecto a los PRM que se encuentran en el rango de bajo fueron originados por un factor antrópico, y se encontraron en cortes o excavaciones artificiales de pequeñas dimensiones, las cuales por la escala del mapa y la equidistancia de las curvas de nivel (20m) no fueron representadas de manera adecuada.

Los resultados expuestos en la Tabla 2.4 derivados del mapa de susceptibilidad a PRM realizado por el análisis multicriterio (Figura 2.20), indican que el 69.27% de los PRM se localizaron en el rango de alto y muy alto, el 23.49% están en zonas de susceptibilidad media y el restante 7.22% se encuentra en zonas bajas y muy bajas. En cuanto a los PRM que se encuentran en el rango bajo, corresponden a la situación mencionada en el párrafo anterior; sin embargo, hay un considerable aumento de este último porcentaje debido a que se incluyen PRM que no están relacionados con los factores o parámetros tomados en cuenta en este trabajo, y es decir que están influidos por construcciones y cortes para caminos.

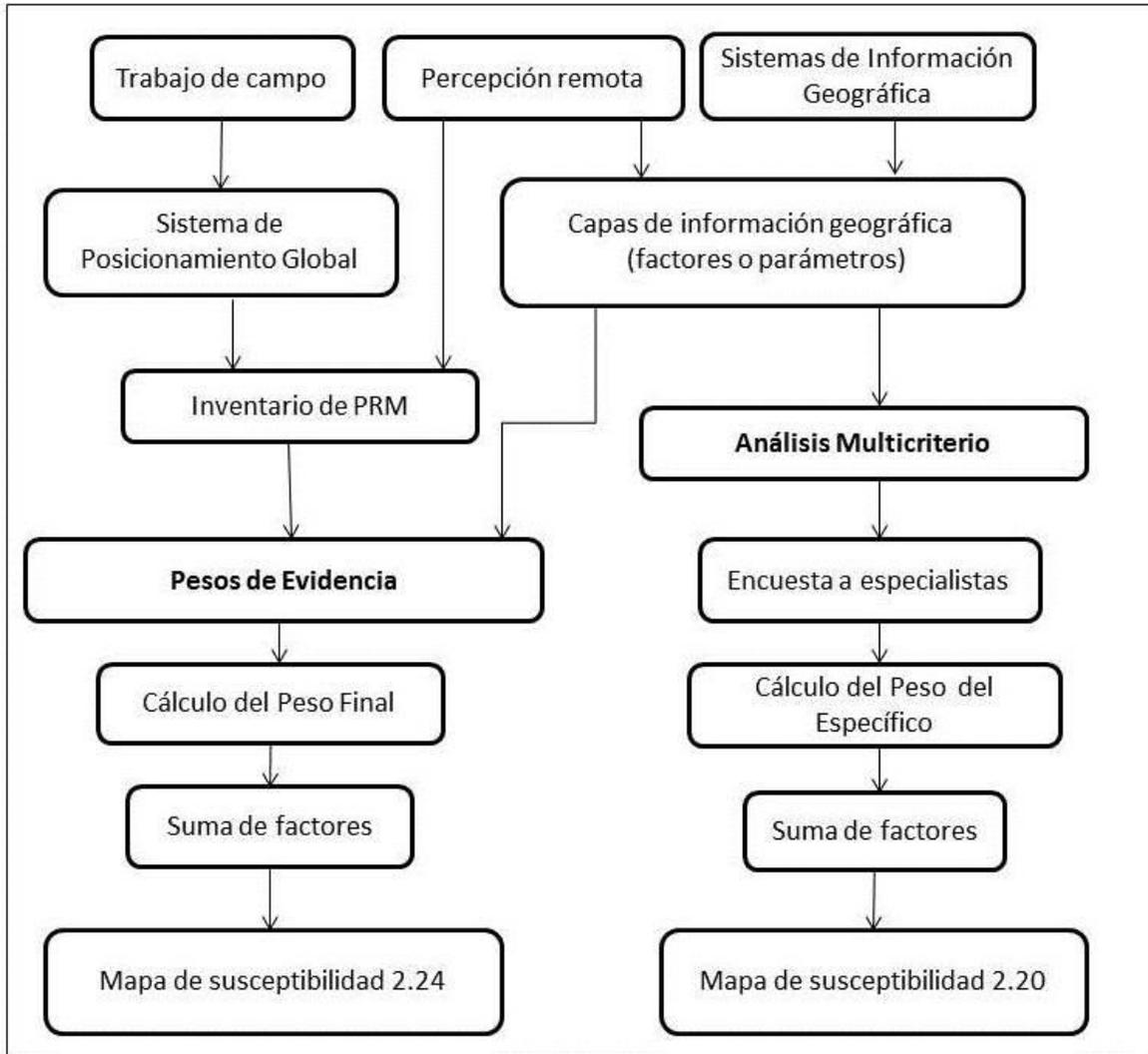


Figura 2.29: Esquema metodológico para la identificación de zonas susceptibles a PRM.

CAPÍTULO 3. SUSCEPTIBILIDAD DE LA RED CARRETERA.

La red carretera representa un elemento susceptible a ser afectado por diversos fenómenos naturales o amenazas, entre los que destacan los PRM, de cuyas afectaciones derivan daños materiales y alteraciones en el servicio que causan costos económicos significativos y repercusiones sociales.

3.1 Conceptos

A continuación se mencionan algunas definiciones de suma relevancia para este capítulo:

De acuerdo con Soldano, (2009), la susceptibilidad se define como la mayor o menor predisposición a que un evento suceda u ocurra sobre un determinado espacio geográfico. Es decir, que es la probabilidad de ocurrencia de algún fenómeno un territorio específico, y este es dado en ciertas condiciones geográficas y ambientales. La susceptibilidad representa a un problema basado en el análisis y la revisión de eventos sucedidos en determinada región con características geomorfológicas, geológicas, hidrometeorológicas, entre otras.

Una red (específicamente en el tema de transporte), se define como el conjunto de vías de comunicación de determinado medio de transporte en un espacio dado (región, estado, e incluso continente), que se unen entre sí, formando un conjunto coherente (Garizurieta *et al.*, 2006).

El término carretera se define como la adaptación de una faja sobre la superficie terrestre que llene las condiciones de ancho, alineamiento y pendiente para permitir el rodamiento adecuado de los vehículos para los cuales ha sido acondicionada (Crespo, 2004).

3.2 Importancia de la red carretera

Debido a que la prevención de desastres asociados a diversos fenómenos naturales ha cobrado gran importancia por el impacto que hay sobre la población y sus bienes, las vías de comunicación o redes carreteras son un elemento de suma importancia que hay que considerar. Algunas de las razones que caracterizan esta importancia son:

- a) Integran comunidades y territorios.

- b) Facilitan las actividades cotidianas de la población.
- c) Permiten el acceso de las comunidades a servicios básicos sociales.
- d) Apoyan al desempeño de las actividades productivas.
- e) Representan el motor de la economía que cualquier región.
- f) Son fundamentales como medio de acceso para atender situaciones de emergencia en caso de la ocurrencia de cualquier desastre.

Por tal motivo, el análisis y estudio de estas redes de comunicación con respecto a las afectaciones que puedan tener, debe ser una prioridad, y además cabe destacar que son consideradas como un patrimonio, por lo que es necesario tratar de proteger su integridad y funcionamiento (García, 2003).

3.3 Red carretera de la región de Teziutlán

3.3.1 Antecedentes

La red carretera del país nació en el año de 1925, pero la región de Teziutlán (Sierra Nororiental) sólo contaba con brechas y veredas. Fue hasta el periodo de 1940-1960 que esta región fue dotada de esta infraestructura, etapa en la cual la red nacional se incrementó hasta dejar comunicado el 33% del territorio nacional (SCT, 1996).

En 1955 el huracán Janet provocó algunos PRM en la zona de estudio, lo que afectó las carreteras y las comunicaciones que indirectamente propiciaron un desabasto alimenticio. Sin embargo, en esa ocasión no hubo grandes pérdidas, por lo que el peligro era mínimo y los procesos se presentaban en lugares deshabitados (Flores *et al.*, 2002).

Como ya se había mencionado en el capítulo 1, las intensas lluvias de octubre de 1999 ocasionaron la ocurrencia de diversos PRM, en donde el sector que presentó los mayores daños fue el de transportes y comunicaciones con el 41.9% de las pérdidas totales (Tabla 1.3).

De acuerdo con información recopilada en campo, el 27 de julio de 2004 se inauguró el último tramo la Autopista Puebla-Teziutlán, que corresponde al tramo Zaragoza-Teziutlán, esta vialidad fue construida con el método de corte de pendientes, lo que han ocasionado que cada año en temporada de lluvias (principalmente en los meses de septiembre y octubre), se presenten

diversos PRM de pequeña magnitud (Figura 3.1), de los cuales, los más significativos sólo han ocasionado la obstrucción de un carril de la misma.



Figura 3:1 Deslizamiento en el kilómetro 115 de la Autopista Puebla-Teziutlán (Foto: Alejandro Galindo).

En septiembre de 2010, la presencia del Huracán Karl provocó la ocurrencia de algunos PRM en las vialidades de la zona de estudio. En cabecera municipal de Teziutlán, el movimiento de mayor impacto se registró en la Avenida Juan Pablo II, vialidad importante que comunica al Barrio de Ahuateno con el de Francia al poniente de la ciudad (Rodríguez, 2010). En el kilómetro 129 de la Carretera Federal Amozoc-Teziutlán, en un paraje denominado La Escondida, se registró un deslizamiento que obstruyó la vialidad por varias horas, hasta que el material fue retirado. Otro proceso de remoción ocurrió en el kilómetro 5 de la carretera Teziutlán-Perote en un sitio denominado Las Coles y pese al riesgo que representó este evento se mantuvo abierta la circulación de vehículos (Noticias de Puebla, 2010).

En septiembre de 2011, las constantes lluvias provocaron la caída de grandes bloques de roca sobre la carpeta asfáltica en el kilómetro 130+500 de la autopista Puebla-Teziutlán, tramo que se encuentra en el municipio de Chignautla; éste evento ocurrió en la noche por lo que no hubo percances y únicamente quedó un carril habilitado para la circulación (Diario de Teziutlán, 2011).

En agosto de 2012, la depresión tropical Ernesto ocasionó diversos eventos asociados a PRM en la infraestructura carretera de la región (Arriola-Bernave, 2012), entre ellos destacan:

- 1) Quedó bloqueado el Libramiento Oriente de Teziutlán en el tramo las Coles-La Legua a la altura de Ixtipan a causa de un deslizamiento de tierra.
- 2) En la Carretera Federal Teziutlán-Nautla a la altura del kilómetro 17 denominado como Cruz Verde, un deslizamiento y desbordamiento de talud bloqueó los dos carriles.
- 3) En el circuito Juan Pablo II hubo socavamiento en un puente.
- 4) En la carretera Teziutlán-Perote, a la altura de Xoloco correspondiente al kilómetro 3, se presentó un considerable encharcamiento.
- 5) En San Juan Tezongo, localidad que se encuentra al norte de la ciudad de Teziutlán, los caminos presentaron socavamiento.
- 6) En el municipio de Tlatlauquitepec, en la Carretera Federal Núm. 129, a la altura del kilómetro 27 denominado como “Banco Negro” ocurrió un deslizamiento sobre la carretera la misma.
- 7) En Jiliapa, que se ubica al norte de la cabecera municipal de Tlatlauquitepec, un árbol cayó sobre la red de distribución de energía eléctrica provocando que toda la comunidad se quedara sin energía eléctrica.
- 8) En el tramo carretero Atotocoyan- Mazatepec, al norte de Hueyapan, cerca de la Presa la Soledad, un árbol cayó sobre la vialidad bloqueando ambos carriles.

Actualmente, la cabecera municipal de Teziutlán es una ciudad con gran movimiento comercial debido a que ahí se concentran diversos productos ganaderos, agrícolas y frutícolas propios de la región (INAFED, 1998). Al mismo tiempo, al ser una ciudad con diversos tipos de servicios y diversas fuentes de empleo, existe un importante desplazamiento de personas provenientes de las localidades y cabeceras municipales de la región, entre las que destaca Hueytamalco, por esto, se ha originado un considerable flujo comercial y de pasajeros en la red carretera actual.

3.2.1 Configuración espacial

Como se puede observar en la Figura 3.5, la configuración de la red carretera y los asentamientos es muy compleja. De acuerdo a la importancia de las vías de comunicación, la parte oeste del área de estudio tiene una configuración lineal (Figura 3.2), es decir, la principal vía de comunicación, la Carretera Federal Amozoc-Teziutlán, cruza por la mayoría de las principales localidades y atraviesa la zona de suroeste a este, mientras que al este de la zona de estudio hay una configuración de tipo nucleado (Figura 3.3), es decir que varias vías de comunicación importantes llegan o salen de un centro urbano importante que en este caso es la ciudad de Teziutlán.

Las carreteras de tipo estatal y municipal se derivan de las federales en forma de ramificaciones y arcos; las ramificaciones comunican a localidades pequeñas con las principales carreteras y los arcos tienen la función de ser libramientos de las localidades más grandes. La Autopista Puebla-Teziutlán tiene un recorrido semi-paralelo a la carretera Amozoc-Teziutlán sin cruzar ninguna localidad importante hasta desembocar en la ciudad de Teziutlán, pero está conectada con tramos alimentadores a la misma; ésto le da una configuración de tipo focal (Figura 3.4) al suroeste de la zona y de tipo nucleado al este de la misma.

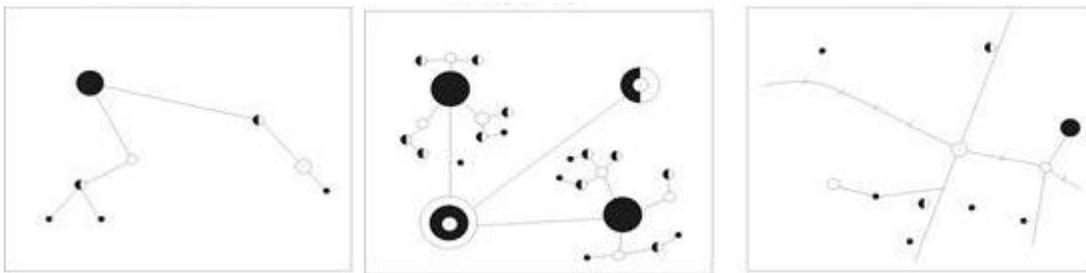


Figura 3.2: Lineal

Figura 3.3: Nucleado

Figura 3.4: Focal

Figuras 3.2, 3.3 y 3.4: Clasificación de los Modelos de Estructuración de los asentamientos (Fuente: Elaboración con base a Franco y Valdivia, s/f).

3.2.2 Tramos carreteros y características

En el presente trabajo se tomaron en cuenta 17 tramos carreteros que comunican a las 10 cabeceras municipales que se encuentran dentro del área de estudio y las cuales pertenecen a la Región de la Sierra Nororiental de Puebla (Figura 3.6).

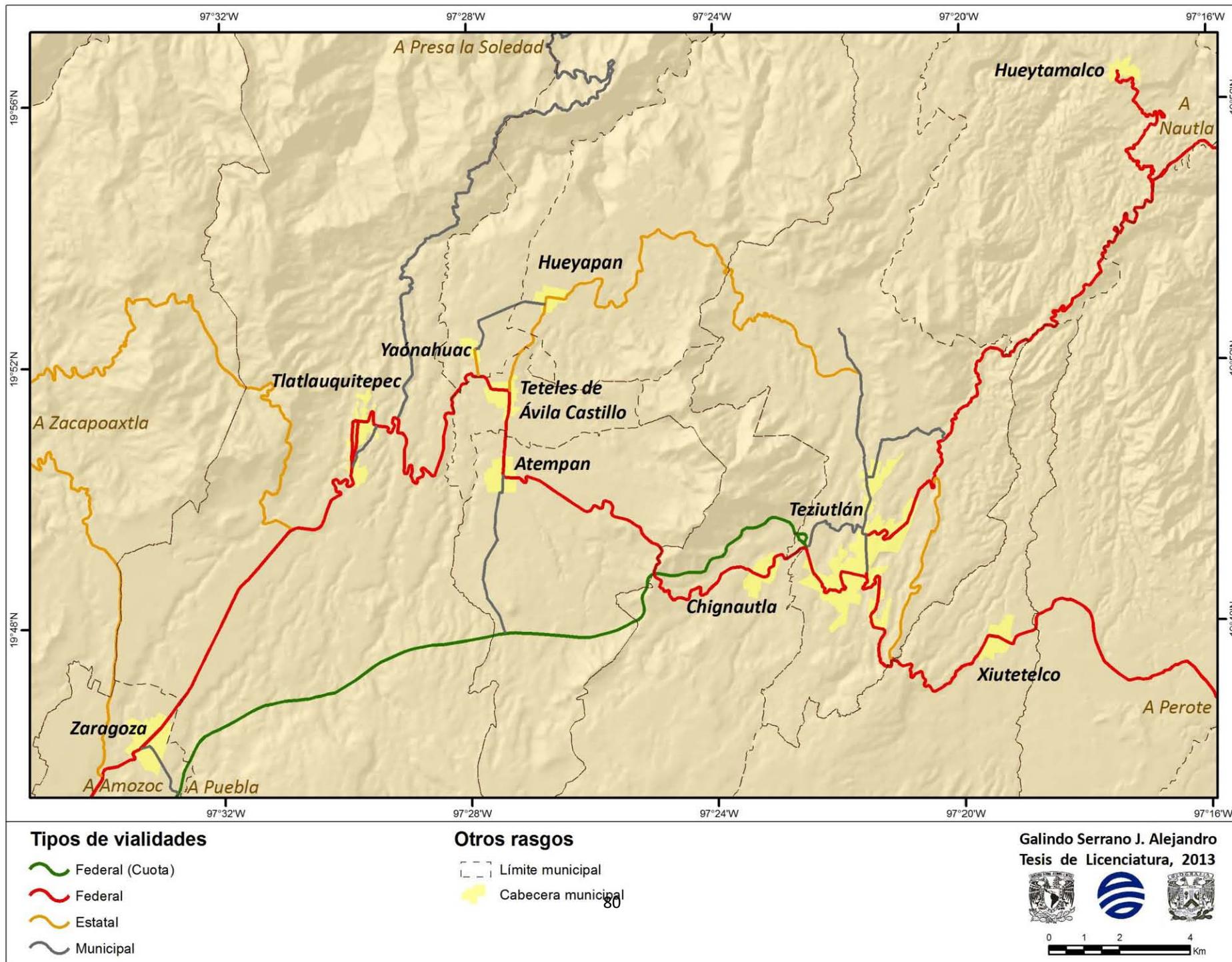


Figura 3.7: Administración de la red carretera.

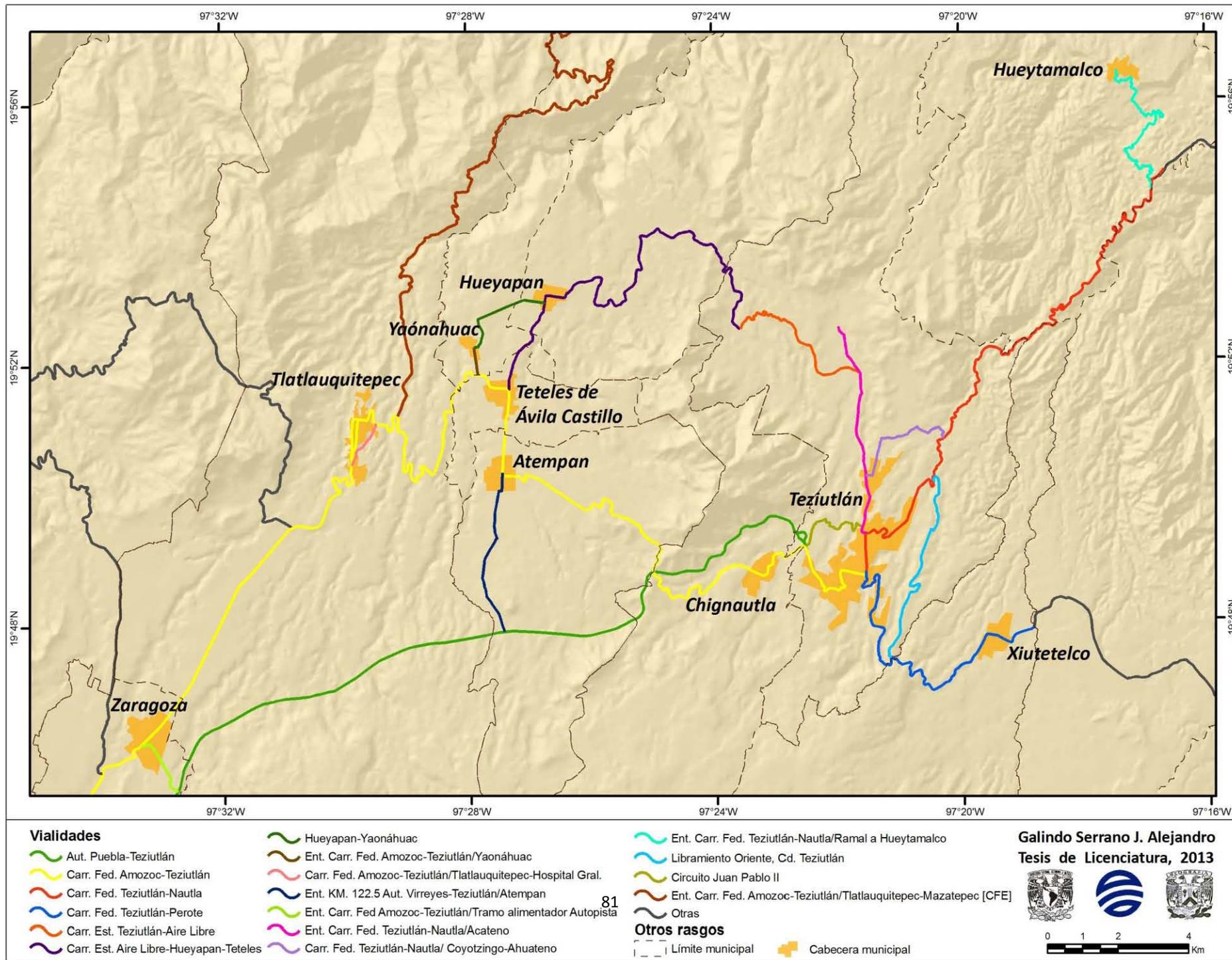


Figura 3.6: Tramos de la red carretera.

Autopista Puebla-Teziutlán

La Autopista Puebla-Teziutlán es una vialidad de tipo federal concesionada marcada con el número 129 D, tiene un recorrido de 62.4 kilómetros, cuenta con 2 carriles y está pavimentada con asfalto. Ésta importante autopista es un ramal de la Autopista Perote-Amozoc (140 D). Su principal función es comunicar a la Ciudad de Teziutlán directamente con la capital del estado de Puebla, ya que no cruza ninguna otra ciudad o localidad.

Su recorrido inicia marcando el kilómetro 25 en el entronque que se encuentra en el kilómetro 62 de la autopista número 140 D en el municipio de Libres. Cruza los municipios de Cuyoaco, Tlatlauquitepec, Zautla, Zaragoza, Atempán, y Chignautla, para finalmente concluir en el municipio de Teziutlán, cuenta con 4 tramos alimentadores que la comunican con las localidades de Cuyocaco, San Miguel Tenenxtatiloyan, Zaragoza y Atempán respectivamente; tiene un dirección de sur a norte que a partir del kilómetro 112 cambia hacia el Noeste-Este; y cuenta con 2 casetas de peaje.

Dentro de la zona de estudio, esta autopista cruza una zona de lomeríos que se encuentran en parte diseccionados por corrientes fluviales, por lo que en la construcción de la misma se empleó el método de corte de pendientes (Figura 3.7). Esta vialidad a pesar de tener constantes PRM, tiene un constante mantenimiento y se encuentra en buenas condiciones.



Figura 3.7: Autopista Puebla-Teziutlán a la altura del municipio de Chignautla, Km.130.

Carretera Amozoc-Teziutlán

La carretera Amozoc-Teziutlán es una vía de comunicación de administración federal indicada con el número 129. Tiene una longitud de 157.9 kilómetros, tiene dos carriles en todo su recorrido excepto del kilómetro 64 al 69 que cuenta con 4 carriles, está pavimentada con concreto hidráulico en el tramo que cruza la cabecera municipal de Tlatlauquitepec en el kilómetro 129, el resto de la vialidad es de asfalto. La función de esta vialidad es comunicar a los municipios de las regiones Valle de Serdán y Sierra Nororiental con la región de Angelópolis, lugar donde se ubica la ciudad de Puebla.

Su recorrido inicia en el entronque con la Carretera Federal Puebla-Tehuacán (150) en la localidad de Amozoc de Mota en el centro del estado de Puebla, cruza por 18 municipios en los cuales destacan las localidades de Tapatlaxco de Hidalgo, Acajete, Rafael Lara Grajales, El Carmen Tequexquitla, Oriental, Libres, San Miguel Tenextatiloyan, Zaragoza y Tlatlauquitepec; finalmente concluye en el kilómetro 157 en la cabecera municipal de Teziutlán.

Esta carretera es muy heterogénea con respecto al área de estudio que inicia en el kilómetro 112; esto debido a que tiene tramos muy conservados y otros en muy mal estado con presencia de grietas y baches; además atraviesa planicies ligeramente diseccionadas en los municipios de Zaragoza, Teteles de Ávila Castillo y Atempan, mientras que en el municipio de Chignautla cruza junto a la sierra del mismo nombre (Figura 3.8), en donde las pendientes son muy abruptas y hay presencia de desprendimientos de rocas, y en el municipio de Tlatlauquitepec cruza lomeríos fuertemente diseccionados (Figura 3.9) donde hay laderas casi verticales originadas por el paso de vehículos y la extracción de material.

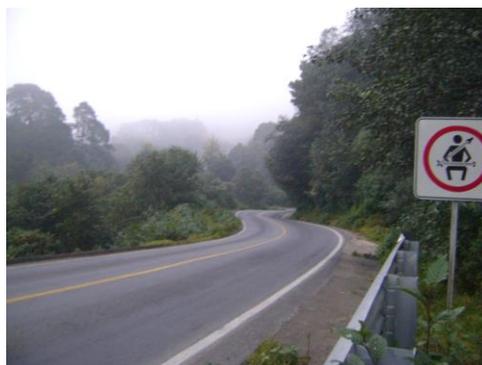


Figura 3.8: Carretera Amozoc-Teziutlán Km. 148, Sierra Chignautla.



Figura 3.9: Carretera Amozoc-Teziutlán, Km. 131, zona urbana de Tlatlauquitepec.

Carretera Teziutlán-Nautla

La carretera Teziutlán-Nautla, es una vialidad de administración federal, tiene el número 129 y es la continuación de la carretera Amozoc-Teziutlán. Su recorrido es de 93.4 kilómetros, tiene 2 carriles en todo su trayecto y su función es comunicar a la ciudad de Teziutlán con el Golfo de México e importantes localidades del centro del estado de Veracruz.

El trayecto comienza en el centro de la ciudad de Teziutlán marcado con el kilómetro 0, después parte hacia el Noreste para entrar al estado de Veracruz; en esta entidad cruza las ciudades de Tlapacoyan y Martínez de la Torre, por último concluye en el entronque con la Carretera Federal Poza Rica-Veracruz (180) muy cerca de la localidad de Nautla.

Con respecto a la zona de estudio, este camino se encuentra en buenas condiciones a pesar de cruzar una zona de transición entre la Sierra Madre Oriental y la Llanura Costera del Golfo, lugar donde hay montañas ligeramente disecionadas (Figura 3.10). Asimismo, esta zona tiene la característica de la constante presencia de neblina y precipitación, lo que ocasiona que la carpeta asfáltica tenga daños y este mojada (Figura 3.11), sin embargo esta vialidad cuenta con un constante mantenimiento por parte de la SCT.

Por otra parte cabe destacar que esta vialidad tiene un considerable tráfico de vehículos, principalmente es gente que se desplaza del municipio de Hueytamalco a la ciudad de Teziutlán a realizar sus actividades laborales.



Figura 3.10: Km 13 Carretera Federal Teziutlán-Nautla (Google Earth, 2009).



Figura 3.11: Presencia de humedad en el Km 19 de la carretera Teziutlán-Nautla.

Carretera Teziutlán-Perote

La carretera Teziutlán-Perote es de administración federal y tiene el número 131, tiene un trayecto de 48 kilómetros, es de 2 carriles y está hecha de asfalto. Esta vialidad comunica a las ciudades de Teziutlán y Altotonga con la Ciudad de Perote, las dos últimas se encuentran en el estado de Veracruz.

Su recorrido comienza al sureste de la ciudad de Teziutlán, cruza localidades y cabeceras de los municipios de Xiutetelco, Jalacingo, Altotonga y Perote; por último concluye en el entronque con la Carretera Federal San Hipolito-Jalapa (140) dentro de la ciudad de Perote.

Dentro del área de estudio, éste camino cruza una zona de barrancos y escarpes (Figura 3.12), se encuentra en un estado un regular por la presencia de grietas en el asfalto, y tiene la característica de tener una afluencia vehicular demasiada alta (Figura 3.13), principalmente de vehículos pesados de carga. Cabe mencionar que esta vialidad se caracteriza por tener frecuentes accidentes de tránsito entre los kilómetros 4 y 7, en una zona denominada Las Coles.



Figura 3.12: Km. 5 de la Carretera Teziutlán-Perote (Fuente: Google Earth, 2009)



Figura 3.13: Flujo de transporte en la Carretera Teziutlán-Perote (Foto: Felipe Juárez).

Carretera Teziutlán-Aire Libre

Esta vialidad de administración estatal es la número 214, tiene una longitud de 2.5 kilómetros y esta pavimentada con asfalto (Figura 3.14). Su función es comunicar a la cabecera municipal de Teziutlán con la localidad de Aire Libre, esta última de suma importancia porque ahí se localiza una institución de educación superior.

Su recorrido es únicamente dentro del municipio de Teziutlán, se localiza al noroeste de dicho municipio con una ruta de sureste-noroeste; cruza una zona de montañas ligeramente diseccionadas y su estado físico es bueno debido, en cuanto al tráfico vehicular es muy bajo debido a que se trata de una vialidad de tránsito local.



Figura 3.14: Carretera Estatal Teziutlán-Aire Libre (Fuente: Google Earth, 2012)

Carretera Aire Libre-Hueyapan-Teteles

La carretera Aire Libre-Hueyapan-Teteles, es la continuación del tramo Teziutlán-Aire Libre, es de administración estatal y está marcada con el número 209, tiene un recorrido de 14.5 kilómetros, esta pavimentada con asfalto y su función es comunicar a diversas localidades del municipio de Hueyapan con su cabecera municipal.

Su trayecto inicia en la localidad de Aire Libre, conectando a los municipios de Teziutlán y Huayapan, cruza por la cabecera municipal de este último y termina su recorrido en el entronque con la Carretera Federal Amozoc-Teziutlán en el municipio de Teteles de Ávila Castillo; en la

primera parte de su recorrido es de lomeríos fuertemente diseccionados, mientras que en la segunda parte es de planicies medianamente diseccionadas; en cuanto al estado físico del primer tramo es muy malo debido a que la carpeta asfáltica está muy dañada (Figura 3.15) e incluso hay presencia de fragmentos de suelo y rocas sobre la misma, el tránsito vehicular es muy bajo, por otra parte el segundo tramo se encuentra en buenas condiciones y el tránsito vehicular es alto (Figura 3.16).



Figura 3.15: Tramo Aire Libre-Hueyapan.



Figura 3.16: Tramo Hueyapan-Teteles (Fuente: Google Earth, 2009).

Hueyapan-Yaonáhuac

Esta vialidad de administración municipal, tiene una longitud de 2.9 kilómetros, el 60 % de su recorrido esta pavimentada con asfalto y el 40% restante de concreto hidráulico, esta vía comunica directamente la cabecera municipal de Yaonáhuac con la cabecera de Hueyapan, su

trayecto es de suroeste a noreste en línea recta, cruzando por una planicie ligeramente diseccionada (Figura 3.17), con un tráfico vehicular muy bajo; las condiciones de esta vialidad son buenas.



Figura 3.17: Carretera Yaonáhuac-Hueyapan (Foto: Mario Marin Torres)

Entronque Carretera Amozoc-Teziutlán/Yaonáhuac

Esta vialidad de administración estatal con el número 210, es un ramal de la carretera federal Amozoc-Teziutlán que se enlaza a la cabecera municipal de Yaonáhuac, tiene una longitud de solo 800 metros, esta pavimentada de asfalto y su estado físico es regular (Figura 3.18); su recorrido que es de sur a norte, va paralelo a un barranco y su afluencia de vehículos es regular.



Figura 3.18: Carretera a Yaonáhuac (Fuente: Google Earth, 2009).

Carretera Amozoc-Teziutlán/ Tlatlauquitepec-Hospital General

Esta vialidad comúnmente conocida como “Libramiento Efrén Ramos Salazar”, es de administración municipal, tiene una longitud de 1.4 kilómetros, es de asfalto y tiene 2 carriles. Se encuentra dentro del municipio de Tlatlauquitepec y su función es ser una alternativa vial para evitar transitar por el centro del mismo municipio. La mitad de su recorrido es a un costado del lecho de una corriente fluvial, y en otra cuarta parte del recorrido hay cortes de laderas; el estado de conservación es malo debido a que la carpeta asfáltica se encuentra dañada (Figura 3.19), y el tránsito de vehículos es bajo.



Figura 3.19: Libramiento Efrén Ramos Salazar (Foto: Felipe Juárez).

Entronque Km. 122.5 Autopista Virreyes-Teziutlán/Atempan

Esta vía de comunicación es de administración municipal, mide 4.8 kilómetros, es de asfalto y tiene 2 carriles. Recorre de sur a norte el municipio de Atempan, y su función es comunicar la cabecera municipal de dicho municipio con la Autopista Puebla-Teziutlán, por lo que es un tramo alimentador de la misma. Su trayecto es sobre planicies onduladas (Figura 3.20), su estado físico es bueno y el tránsito de vehículos es muy bajo.

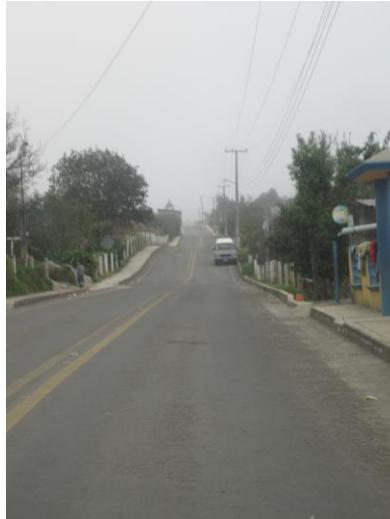


Figura 3.20: Camino municipal de Atempan.

Entronque Carretera Amozoc-Teziutlán/Tramo alimentador a Autopista Puebla-Teziutlán

Vialidad de administración municipal con una longitud de 1.9 kilómetros, está hecha de asfalto y es de 2 carriles. Su función es comunicar a la cabecera municipal de Zaragoza con la Autopista Puebla-Teziutlán, su estado físico de conservación es bueno, el tráfico de vehículos es regular y cuenta con una caseta de cobro. Su corto recorrido es sobre una planicie (Figura 3.21), sin embargo en el entronque con la autopista hay cortes de laderas de aproximadamente 10 metros de altura. El trazo de este tramo carretero se hizo sobre la antigua ruta del ferrocarril Oriental-Teziutlán.



Figura 3.21: Camino municipal de Zaragoza (Fuente: Google Earth, 2009).

Entronque Carretera Teziutlán-Nautla/Acateno

Esta carretera, se encuentra dentro del municipio de Teziutlán, por lo tanto es de administración municipal, tiene 6.2 kilómetros de longitud, cuenta con 2 carriles y es de asfalto. Su función es comunicar el centro de la ciudad de Teziutlán con la localidad de San Juan Acateno la cual se encuentra al norte del municipio, además cruza importantes colonias de la mancha urbana de Teziutlán que se está extendiendo hacia el norte, las colonias son: El Edén, Ahuateno, Valle Dorado y Barrio de San Diego. Su tráfico de vehículos es muy alto y el estado de conservación es regular (Figura 3.22) ya que unos tramos están en buenas condiciones, mientras que otros se encuentran en mal estado. Su recorrido es por lomeríos fuertemente diseccionados y va paralelo entre 2 barrancos.



Figura 3.22: Camino municipal Teziutlán-Acateno.

Carretera Amozoc-Teziutlán/ Coyotzingo-Ahuateno

Esta vialidad de tipo municipal tiene una longitud de 3.5 kilómetros, es de asfalto y cuenta con 2 carriles. Comunica a la carretera Teziutlán-Aire Libre con la Federal Teziutlán-Nautla enlazando a las localidades de Atoluca y El Carrizal que se encuentran al norte de Teziutlán. El tránsito de vehículos es bajo y su estado de conservación es muy malo que incluso hay tramos de terracería (Figura 3.23); su recorrido es de oeste a este y cruza por una planicie ligeramente diseccionada.



Figura 3.23: Vialidad en estado de conservación muy malo (Foto: Matilde Cruz).

Entronque Carretera Teziutlán-Nautla/Ramal a Hueytamalco

Esta carretera de administración federal es un ramal de la carretera Teziutlán-Nautla (129), tiene una longitud de 6.9 kilómetros, cuenta con 2 carriles y esta pavimentada de asfalto. Su objetivo es comunicar a la localidad de El Mohón que se localiza en el kilómetro 19 de la carretera número 129 con la cabecera municipal de Hueytamalco; su trayecto es de sureste a noroeste. Su estado de conservación es malo debido a la constante presencia de humedad la cual daña la carpeta asfáltica (Figura 3.24) y el paso de vehículos es constante. El lugar por donde pasa esta vialidad es sierra por lo que tiene curvas constantes y cabe destacar la presencia de varios muros de contención de reciente construcción a lo largo del camino debido a las fuertes pendientes (Figura 3.25).



Figura 3.24: Las continuas precipitaciones causan daños en las vialidades (Foto: Felipe Juárez).



Figura 3.25: Muros de contención en la carretera a Hueytamalco (Foto: Matilde Cruz).

Libramiento Oriente de Teziutlán

Este camino de administración estatal es el número 215, tiene una ruta 6.3 kilómetros, es de 2 carriles y esta pavimentado de asfalto. Enlaza al kilómetro 5 de la carretera Teziutlán- Perote (131) con el kilómetro 5 de la Teziutlán-Nautla (129). El estado de físico es regular (Figura 3.26) y el tránsito de vehículos es muy escaso debido a que no comunica a ninguna colonia o localidad con alto número de población. Su trayecto es de sur a norte y cruza una zona de lomeríos medianamente diseccionados.



Figura 3.26: Libramiento Oriente de Teziutlán.

Circuito Juan Pablo II

El Circuito Juan Pablo II es una vialidad de administración municipal que se encuentra al noroeste de la ciudad de Teziutlán, tiene una longitud de 2.8 kilómetros, es de 2 carriles y esta construida con concreto hidráulico. Comunica a la colonia Ahuateno (lugar donde se encuentra el enlace de la carretera federal a Nautla con la carretera estatal a Aire Libre) con El Fresnillo (lugar donde inicia la Autopista Teziutlán-Puebla 129 D y la carretera Teziutlán-Amozoc), por lo que su función es ser un libramiento para que los vehículos provenientes de las localidades que están al norte de Teziutlán, Hueytamalco y Tlapacoyan eviten entrar al centro de Teziutlán.

El flujo de vehículos es alto y la vialidad se encuentra en excelentes condiciones debido a que fue remodelada recientemente (Figura 3.27); sin embargo cabe destacar que cruza por una zona de barrancas donde se hizo corte de pendientes y no se cuenta con muros de contención o anclas estabilizadoras a pesar de que en el pasado hubo presencia de PRM.



Figura 3.27: Circuito Juan Pablo II, Teziutlán (Fuente: Google Earth,2009).

Entronque Carretera Amozoc-Teziutlán/Tlatlauquitepec-Mazatepec

Esta vialidad de tipo municipal tiene un recorrido de 25.2 kilómetros, tiene 2 carriles y esta pavimentada con asfalto en un 90% ya que cuenta con tramos pavimentados con concreto hidráulico (Figura 3.28). Su función es comunicar a la Presa La Soledad y a la localidad de Atotocoyan con la Carretera Federal Amozoc-Teziutlán; su recorrido es en los municipios de

Tlatlauquitepec y Yaonáhuac con una dirección del suroeste a noreste. Su estado de conservación es regular ya que presenta considerables contrastes con tramos muy conservados (Figura 3.30) y otros muy dañados (Figura 3.29). El tránsito de vehículos es regular, ya que se trata de una vialidad local donde gente que se desplaza principalmente de las pequeñas localidades a la cabecera municipal de Tlatlauquitepec. En cuanto a las características físicas de la zona, del kilómetro 1 al 5 hay lomeríos medianamente diseccionados, y a partir del kilómetro 6, se trata de montañas con barrancos fuertemente diseccionados.



Figura 3.28: Tramo en buen estado Km. 15.



Figura 3.29: Tramo en mal estado Km. 5.

3.4 Susceptibilidad y red carretera: Análisis espacial

La determinación de los tramos carreteros susceptibles a PRM se obtiene por medio del análisis espacial. Este análisis es un conjunto de herramientas que forman parte de un SIG, tienen la característica de procesar y analizar datos en términos de la posición geográfica que ocupa un elemento y de las relaciones topológicas que guardan entre ellos (García, 2003).

En un SIG, las relaciones topológicas de los datos geográficos se dividen en 4 tipos (Backhoff, 2002):

1- Adyacencia y proximidad: Es la relación de vecindad entre 2 o más elementos que comparten límites comunes. La relación de adyacencia se presenta entre entidades cuando los rasgos geográficos como líneas (carreteras) o áreas (área con muy alta susceptibilidad a PRM) sean parcial o totalmente coincidentes o contiguos. La relación proximidad, registra los elementos (laderas inestables) situados en torno a un elemento geográfico de interés (una vialidad) dentro de un margen determinado de distancia.

2- Contención: Comprende la localización de elementos geográficos (puntos, líneas o polígonos) dentro de los límites de un elemento de mayor dimensión (polígono). Es decir, cualquier elemento de un mapa que este ubicado dentro de un área o polígono. Ejemplo: En el municipio de Tlatlauquitepec se localizan 8 PRM.

3- Conectividad: Es la relación de conectar físicamente elementos geográficos, se presenta cuando existe una intersección planimétrica entre los rasgos involucrados.

4- Intersección: Es la relación que existe entre elementos espaciales cuando el total o parte de ellos coinciden en una misma ubicación geográfica y cada elemento esta diferenciado por sus propias características, es decir que dos rasgos geográficos comparten al menos un punto o alguna área en común.

El análisis espacial cuenta con cinco herramientas analíticas primordiales: proximidad, superposición, conglomerados, redes y rutas, y de terreno (Backhoff, 2002); dos de ellas, el análisis de proximidad y el análisis de superposición, se utilizaron para obtener la relación que hay entre los dos elementos de interés, que en este caso son la red carretera y las áreas susceptibles a PRM.

En el análisis de proximidad se buscan los grados de susceptibilidad a PRR situados alrededor de una vía de comunicación que se encuentre a una distancia determinada. Esto se realiza a través de una instrucción con la que se seleccionan las zonas con grado de susceptibilidad, ubicadas a determinada distancia o por medio de la definición de áreas de influencia denominadas “buffers”, cuyo propósito es delimitar dicha área (Figura 3.30).

El análisis de superposición es la función más utilizada en los SIG, debido a que la propia estructura de los datos conduce a que la superposición sea una propiedad implícita de la naturaleza de estas herramientas. Este proceso comprende la integración de las diferentes capas temáticas de información, en este caso los dos elementos de interés mencionados anteriormente. La superposición (*overlay*) es muy simple, si solo se emplea para la visualización (Figura 3.31), pero se vuelve compleja cuando se involucran operaciones de análisis para integrar varias capas físicamente y generar nueva información.

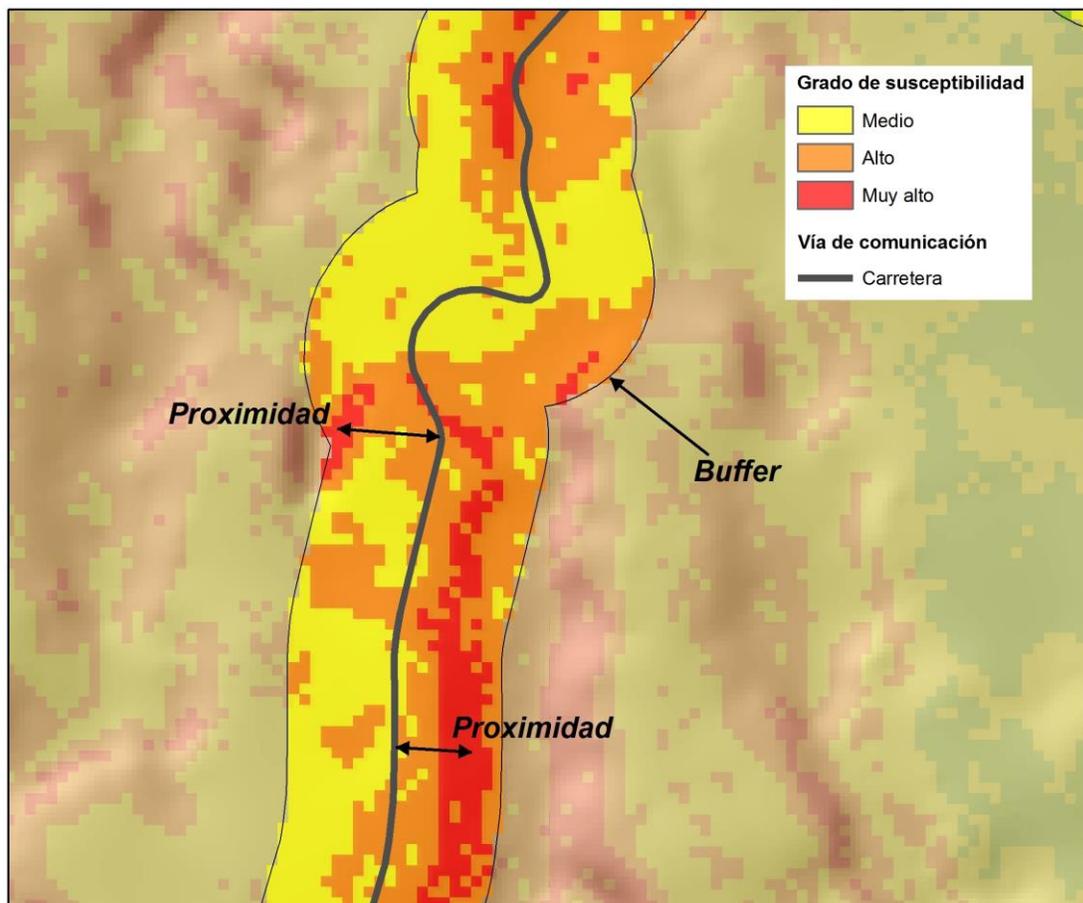


Figura 3.30: Análisis de proximidad.

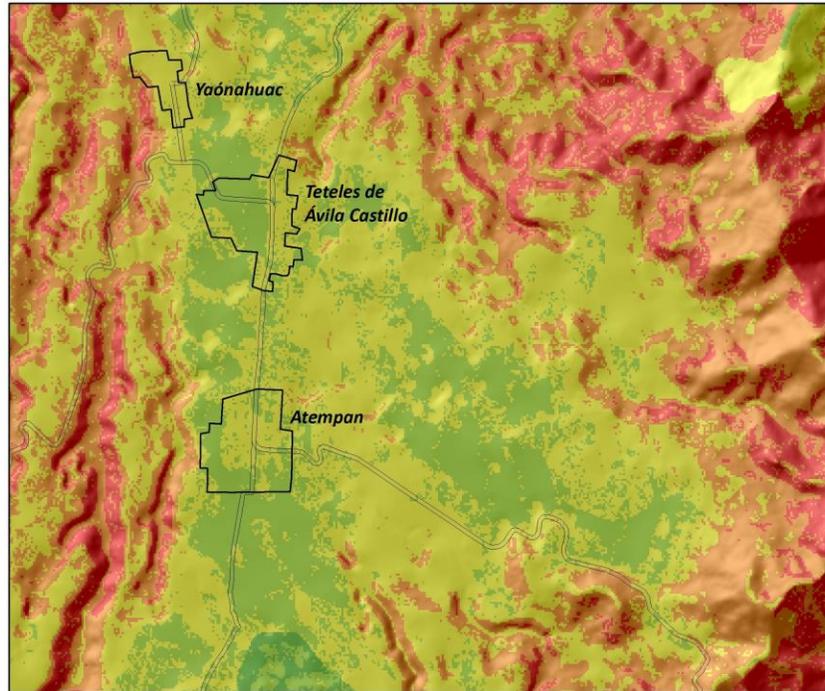


Figura 3.31: Superposición de 4 capas de información geográfica: 1- Modelo sombreado. 2- Grado de susceptibilidad a PRM. 3- Red Carretera. 4- Zonas urbanas.

3.4.1 Tramos susceptibles a PRM de la red carretera

Mediante el uso del análisis de proximidad y superposición entre el trazo de la red carretera y las áreas con muy alta susceptibilidad, se detectaron los tramos que están más expuestos a la presencia de PRM. El análisis de proximidad se representó por medio de 2 mapas del área de estudio (Figuras 3.32 y 3.50), en los cuales se muestra el área de influencia de 200 metros (Yalcin, 2008) que hay entre los dos elementos mencionados anteriormente. El análisis de superposición se representó mediante una gráfica para cada tramo carretero, en la cual el eje “X” representa el recorrido de dicho tramo, y el eje “Y” representa el grado de susceptibilidad. Se emplearon gráficas para mostrar a detalle los resultados, debido a que la cartografía digital generada, tiene una unidad de pixel de 20 metros, misma que no se puede representar claramente en un mapa o elemento lineal cuya longitud representa más de 22 kilómetros.

De la Figura 3.34 a la 3.49, se muestran los resultados de los tramos susceptibles determinados por el método del análisis multicriterio.

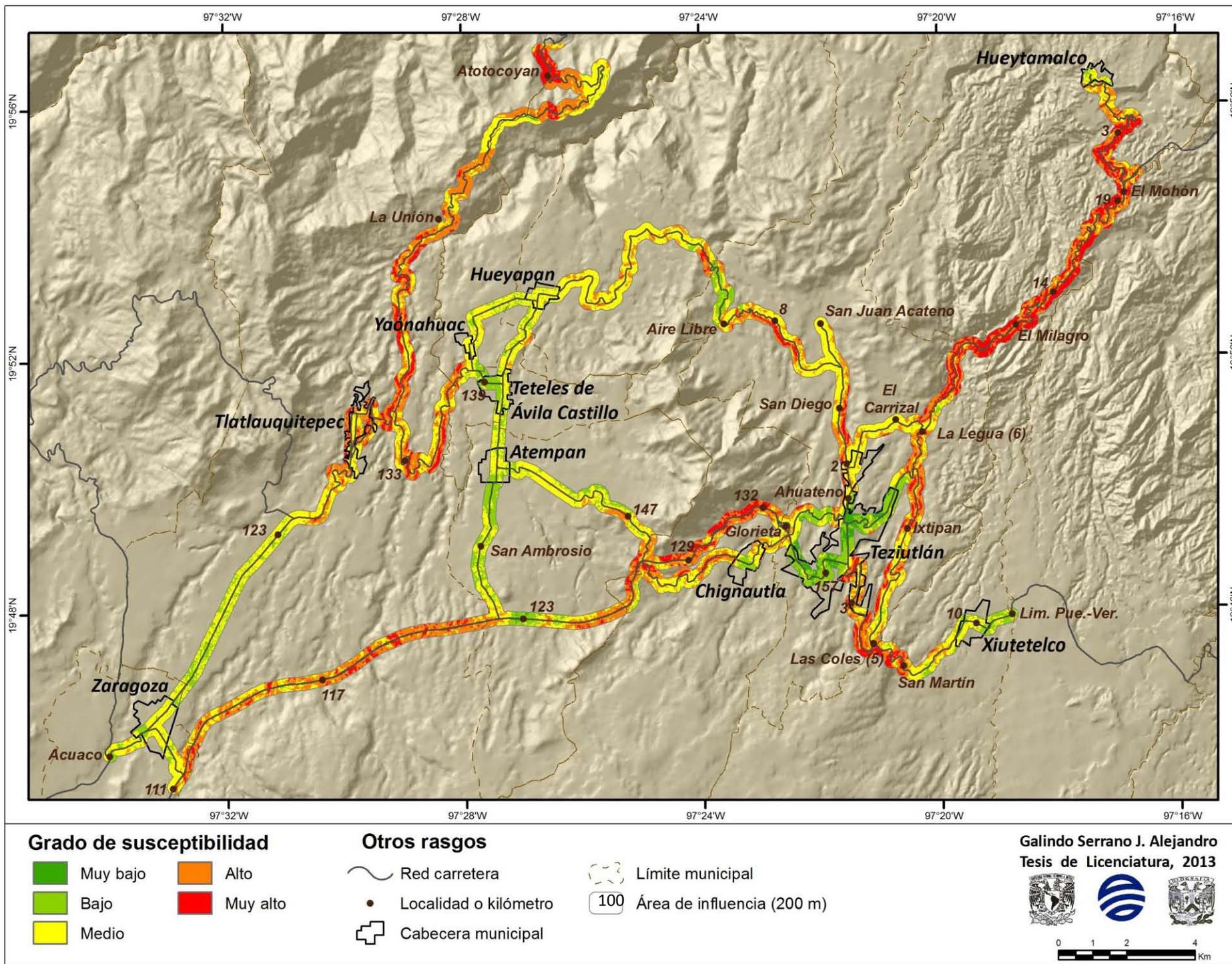


Figura 3.32 Susceptibilidad a PRM determinada por el método de Analisis Multicriterio en la Red Carretera de la Sierra Nororiental.

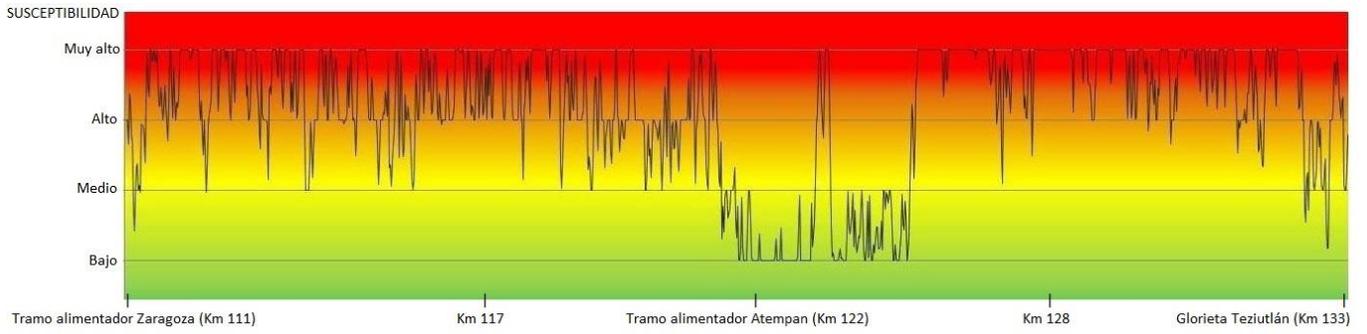


Figura 3.33: Susceptibilidad a PRM en la Autopista Puebla-Teziutlán, Tramo Zaragoza-Teziutlán.

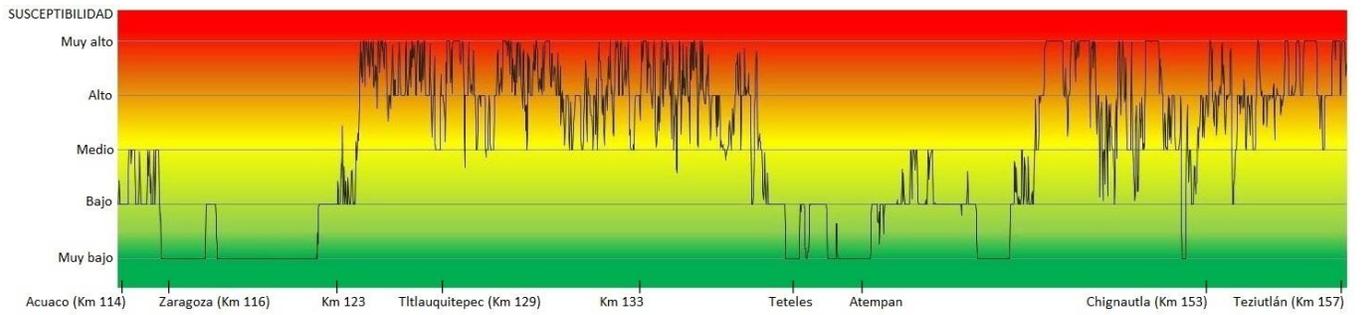


Figura 3.34: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Amozoc-Teziutlán, Tramo Acuaco-Teziutlán.



Figura 3.35: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Teziutlán-Nautla, Tramo Teziutlán- El Mohón (Límite Puebla -Veracruz).

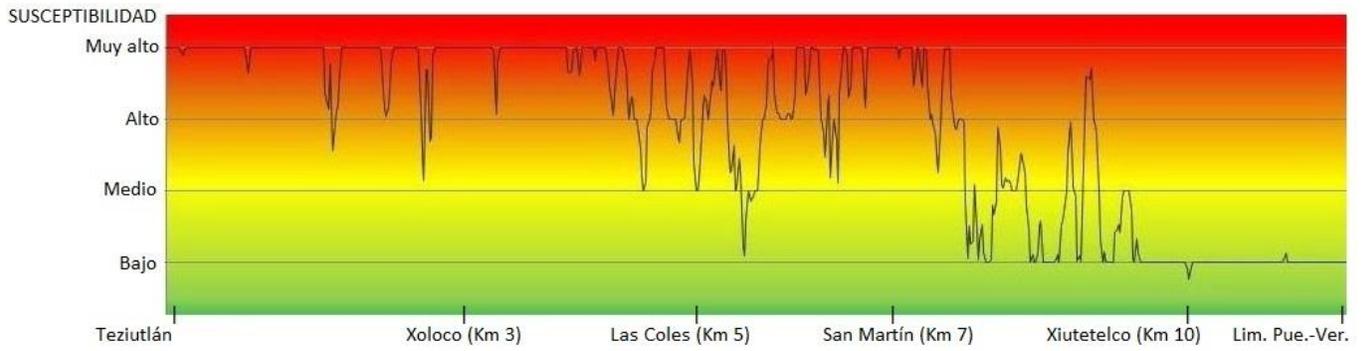


Figura 3.36: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Teziutlán-Perote, Tramo Teziutlán-Jalacingo.

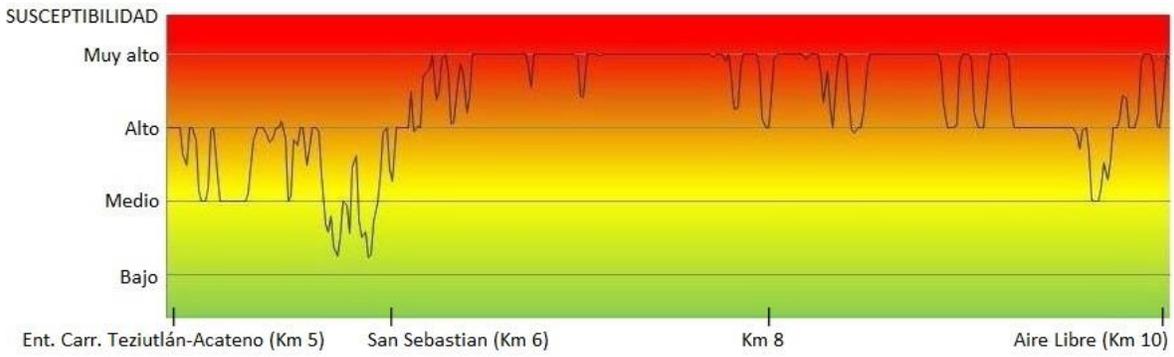


Figura 3.37: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Teziutlán-Aire Libre.

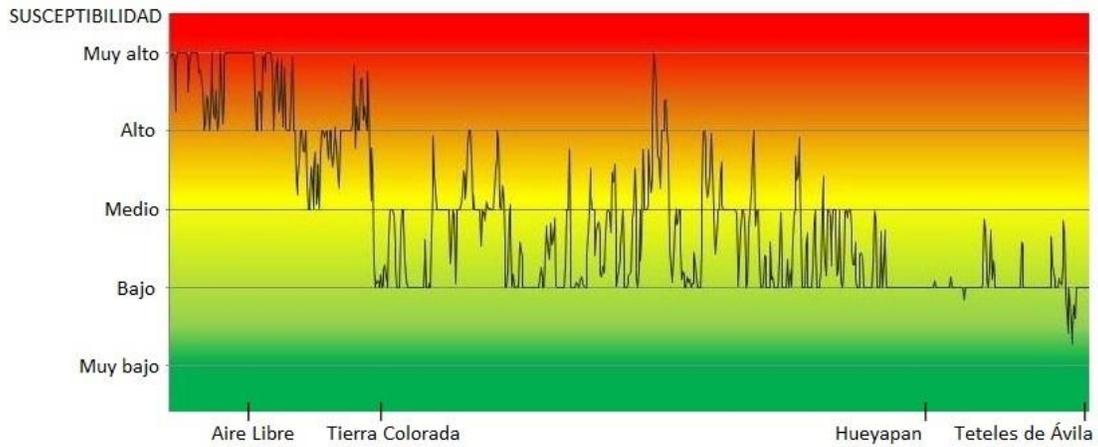


Figura 3.38: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Aire Libre-Teteles.

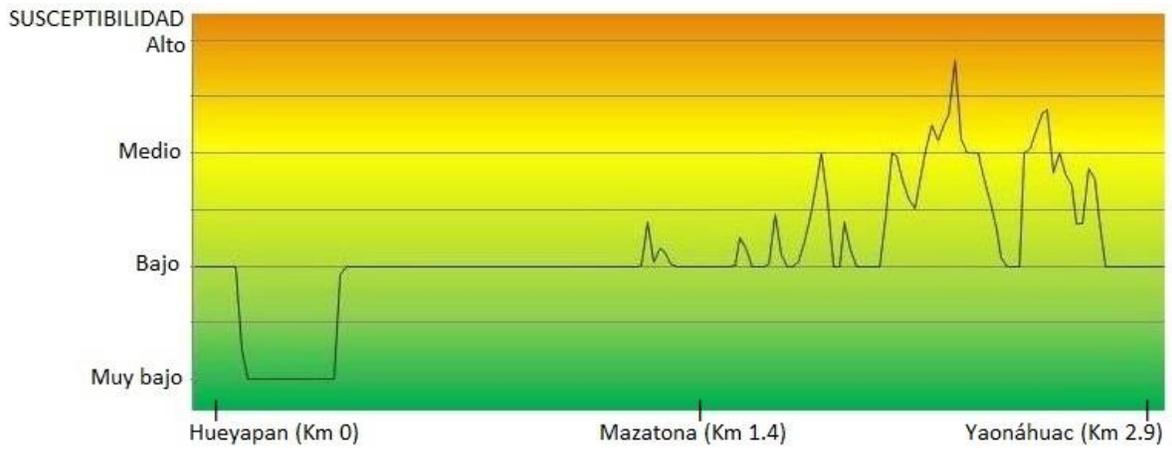


Figura 3.39: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Huayapan-Yaonahuac.

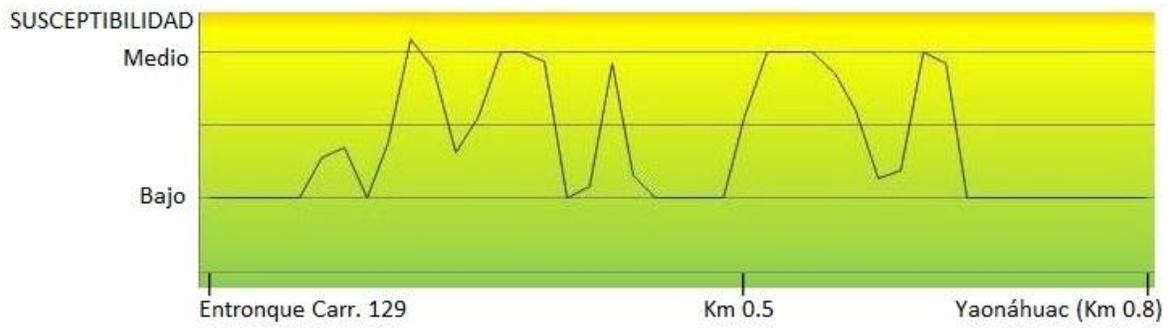


Figura 3.40: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Amozoc-Teziutlán/ Yaonahuac.

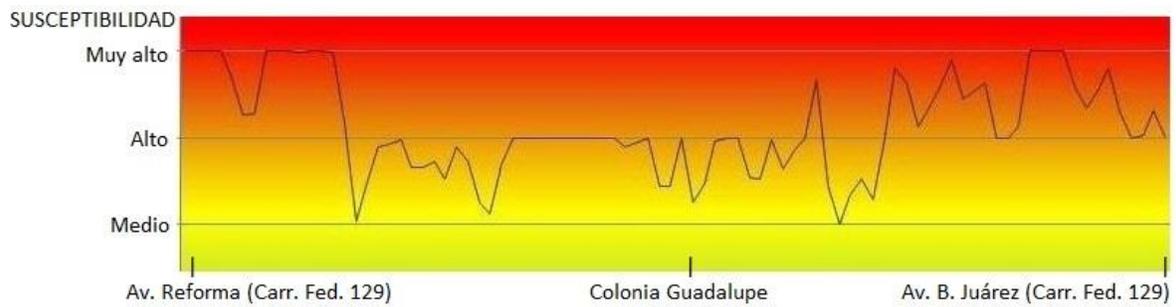


Figura 3.41: Susceptibilidad a PRM en el Libramiento de Tlatlauquitepec.

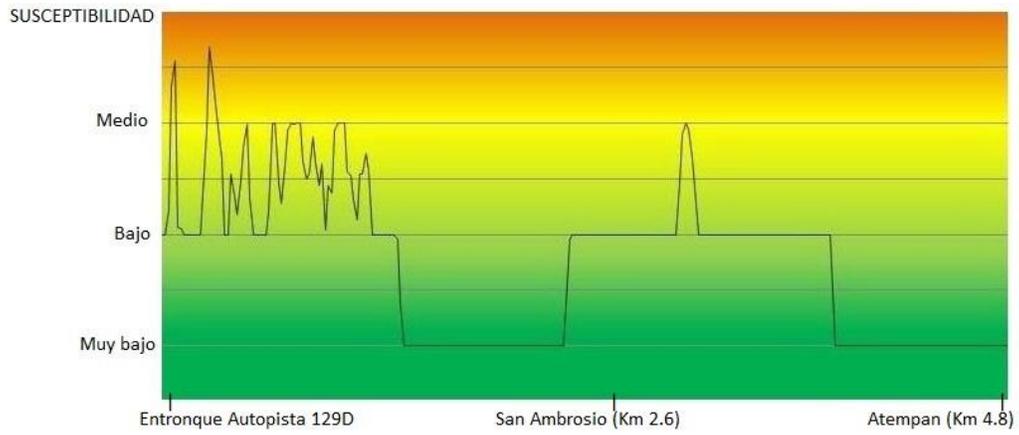


Figura 3.42: Susceptibilidad a PRM en el Tramo alimentador Autopista-Atempan.

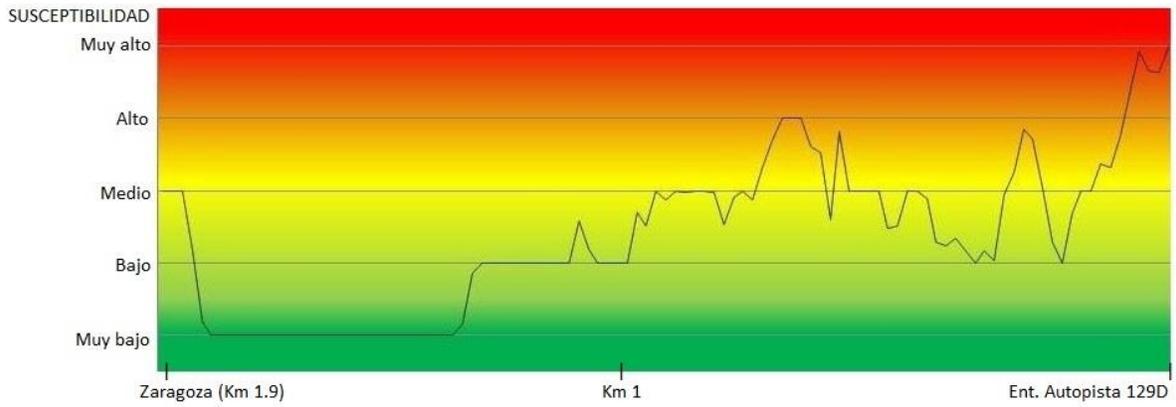


Figura 3.43: Susceptibilidad a PRM en el Tramo alimentador Autopista-Zaragoza.



Figura 3.44: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Teziutlán-Acateno.

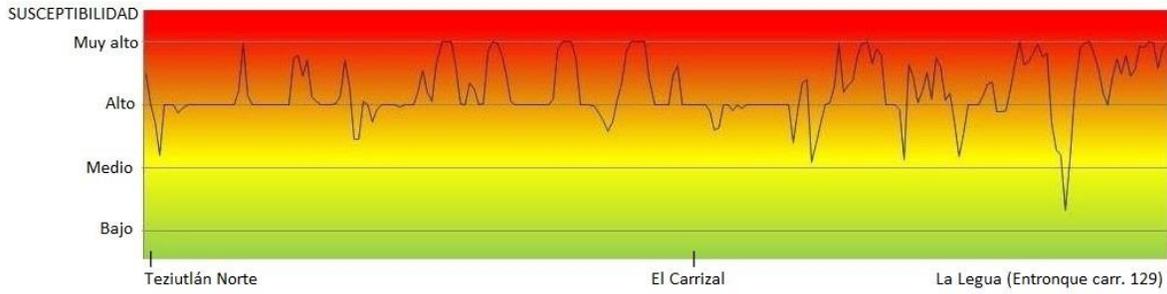


Figura 3.45: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Teziutlán-Acateno/Entronque Teziutlán-Nautla.

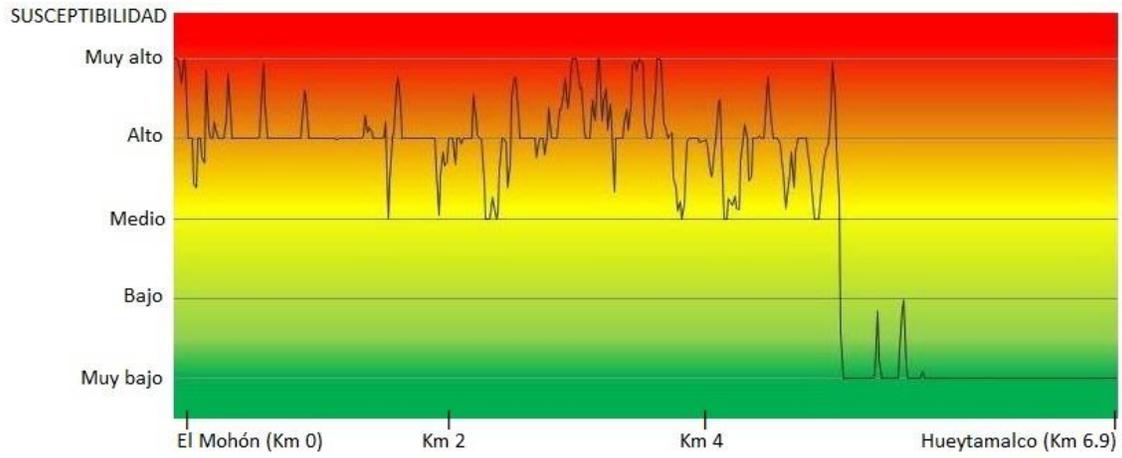


Figura 3.46: Susceptibilidad a PRM en el Ramal El Mohón-Hueytamalco.

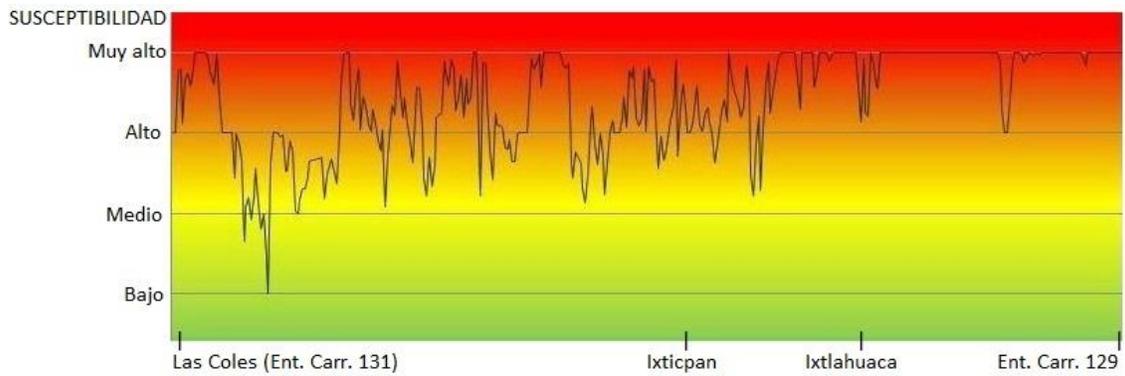


Figura 3.47: Susceptibilidad a PRM en el Libramiento Oriente de Teziutlán.

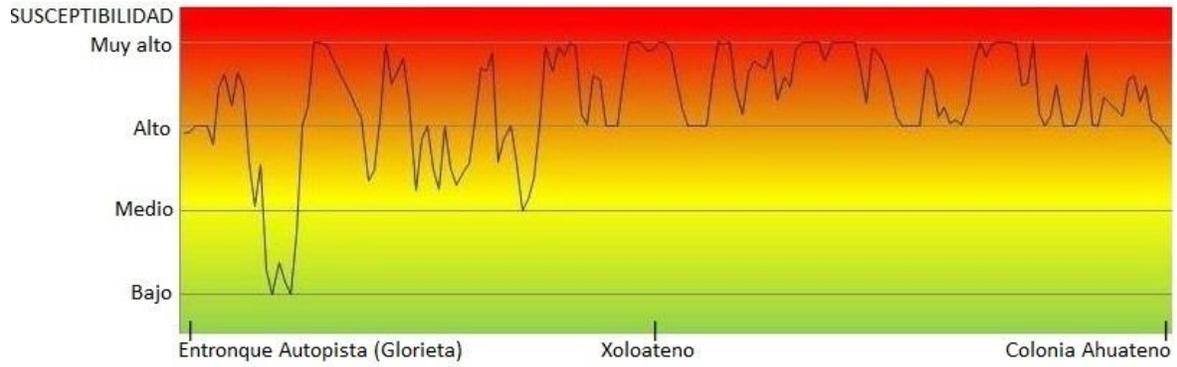


Figura 3.48: Susceptibilidad a PRM en el Circuito Juan Pablo II.

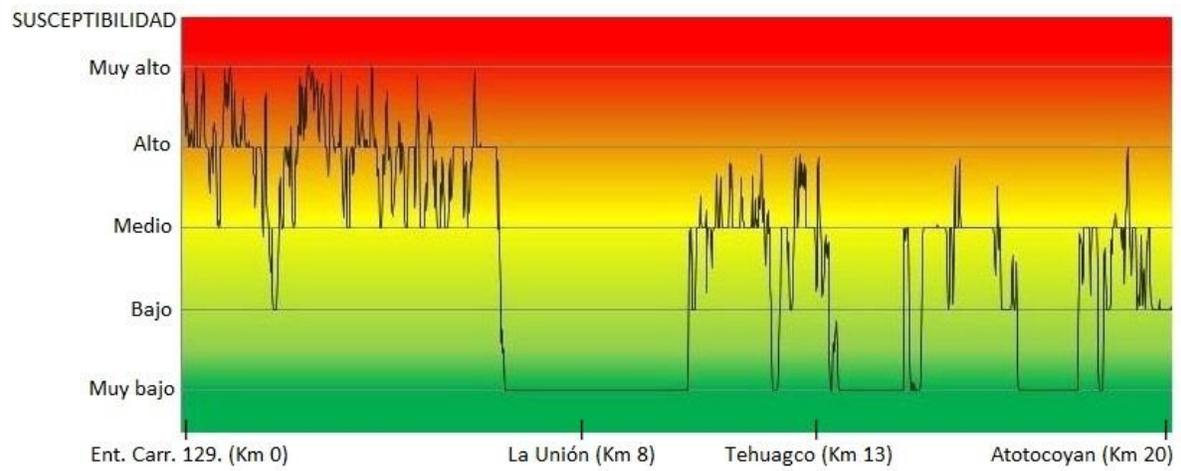


Figura 3.49: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Amozoc-Teziutlán/Mazatepec, Tramo Tlatlauquitepec- Atotocoyan.

Los resultados de pesos de evidencia son los siguientes (De la Figura 3.50 a la 3.69):

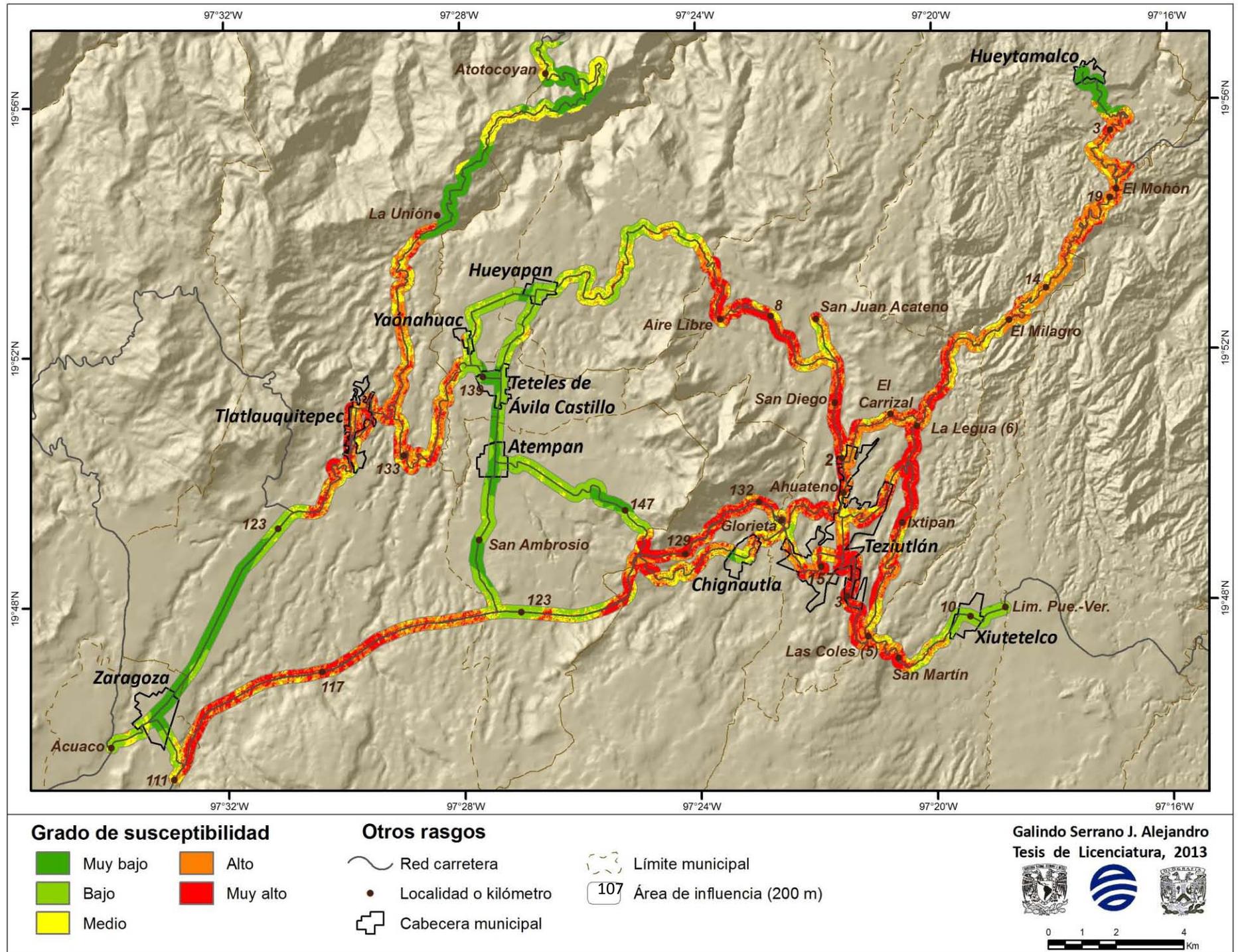


Figura 3.50 Susceptibilidad a PRM determinada por el método de Pesos de Evidencia en la Red Carretera de la Sierra Nororiental.

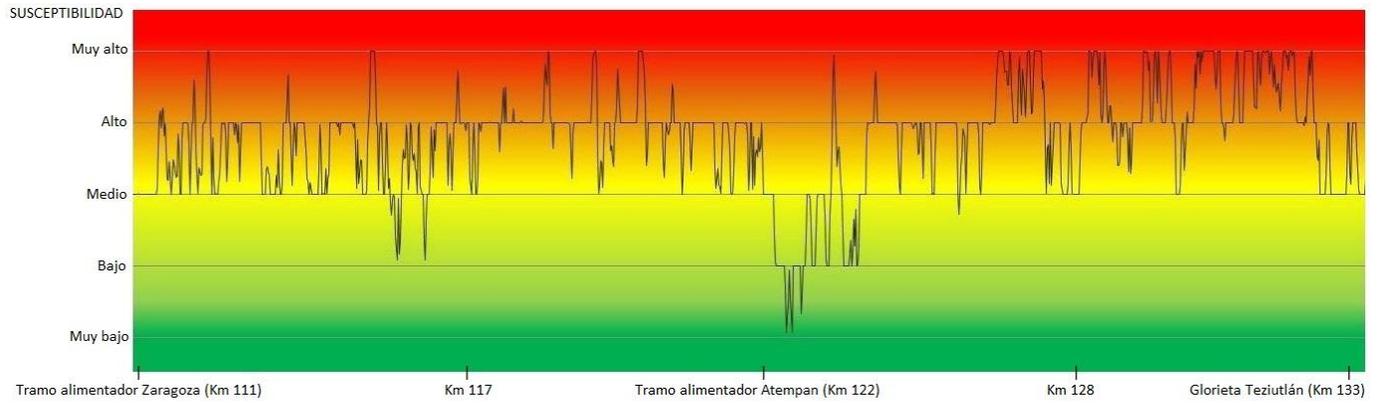


Figura 3.51: Susceptibilidad a PRM en la Autopista Puebla-Teziutlán, Tramo Zaragoza-Teziutlán.

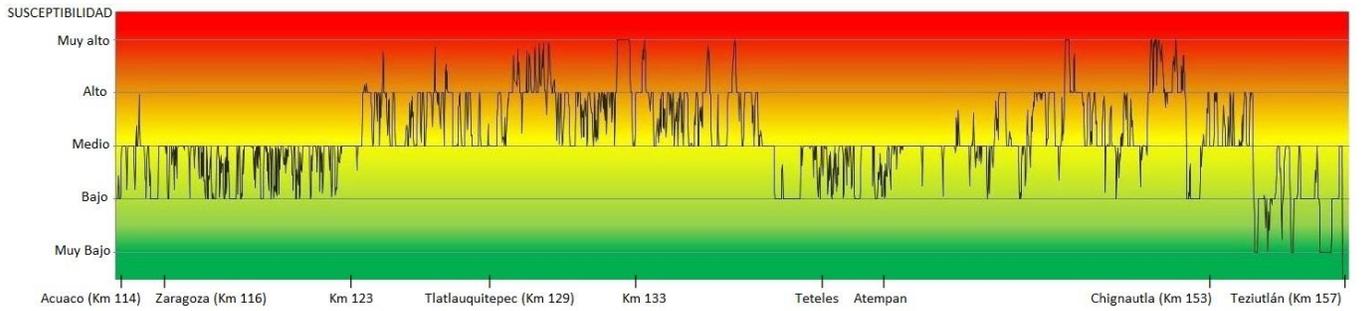


Figura 3.52: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Amozoc-Teziutlán, Tramo Acuaco-Teziutlán.



Figura 3.53: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Teziutlán-Nautla, Tramo Teziutlán- El Mohón (Límite Puebla -Veracruz).

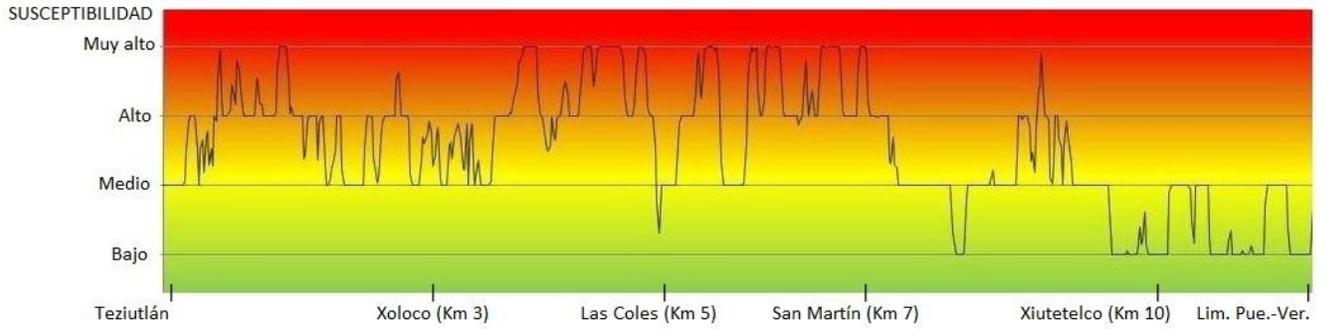


Figura 3.54: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Federal Teziutlán-Perote, Tramo Teziutlán-Jalacingo.

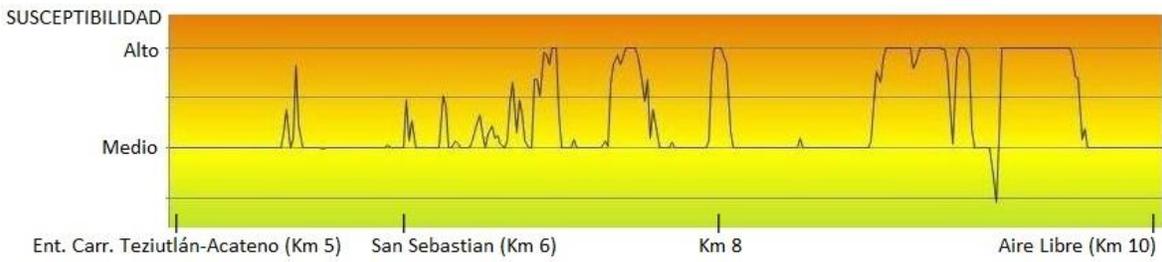


Figura 3.55: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Teziutlán-Aire Libre.

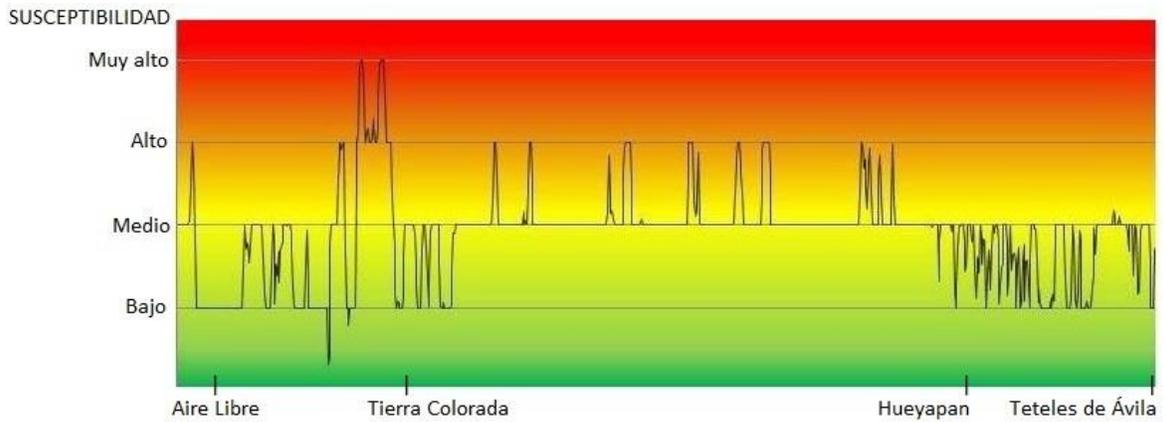


Figura 3.56: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Aire Libre-Teteles.

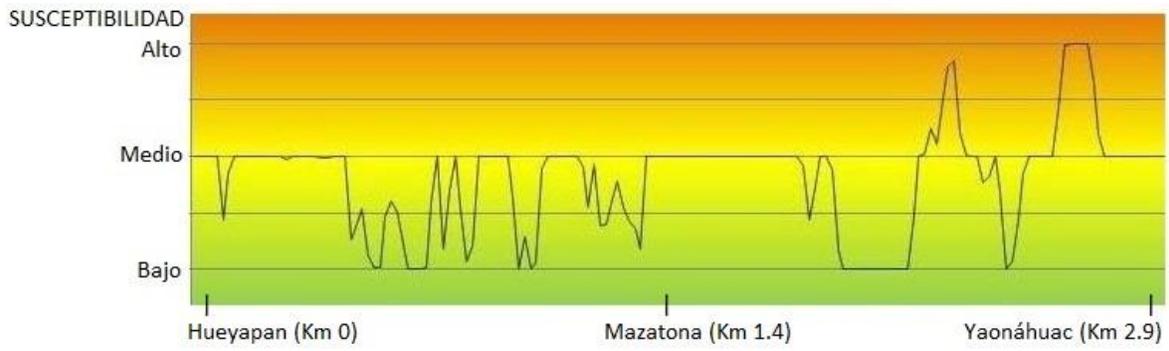


Figura 3.57: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Huayapan-Yaonahuac.

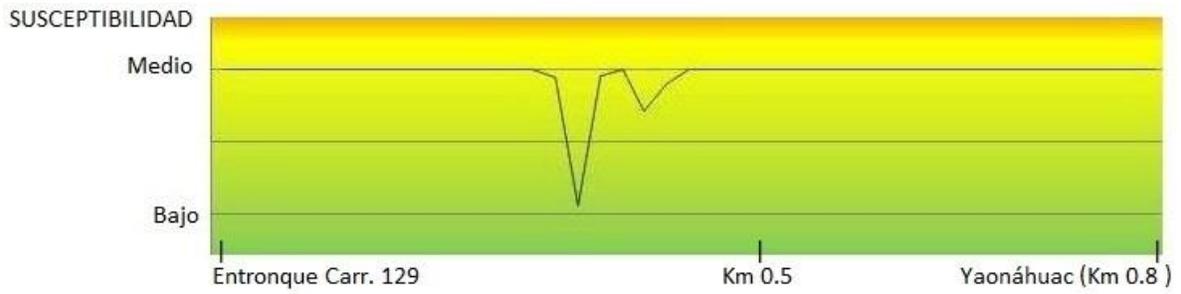


Figura 3.58: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Amozoc-Teziutlán/ Yaonahuac.



Figura 3.59: Susceptibilidad a PRM en el Libramiento de Tlatlauquitepec.



Figura 3.60: Susceptibilidad a PRM en el Tramo alimentador Autopista-Atempan.

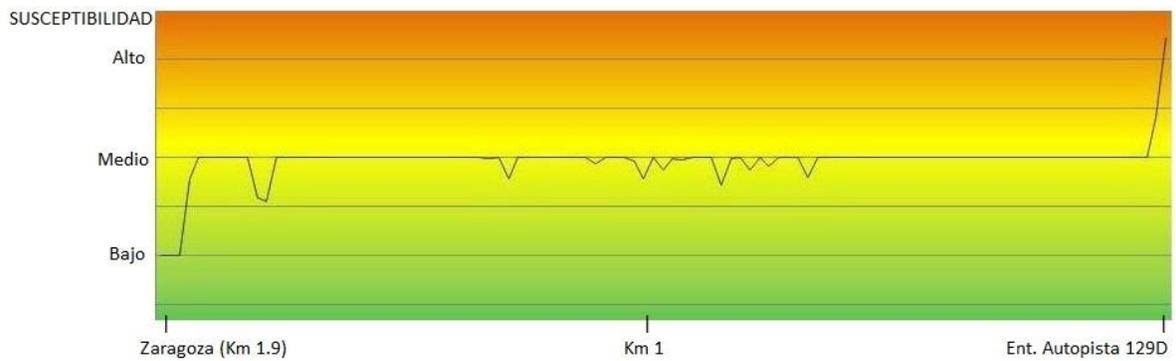


Figura 3.61: Susceptibilidad a PRM en el Tramo alimentador Autopista-Zaragoza.

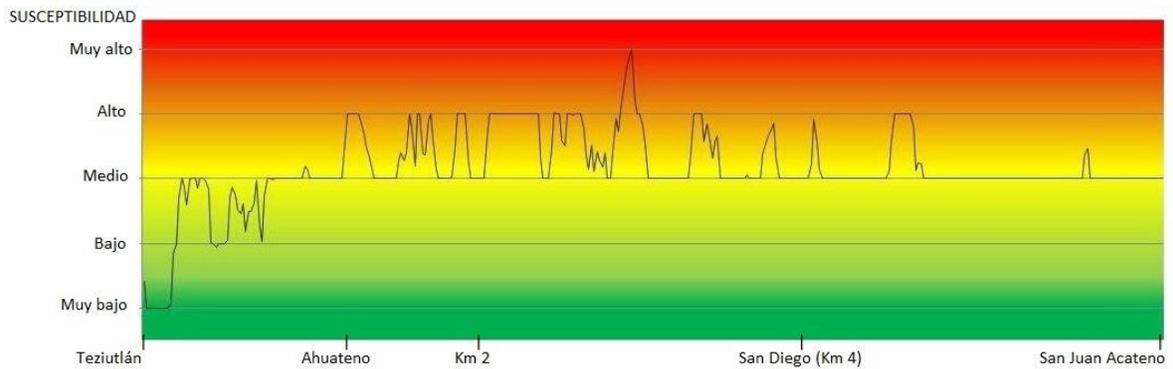


Figura 3.62: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Teziutlán-Acateno.

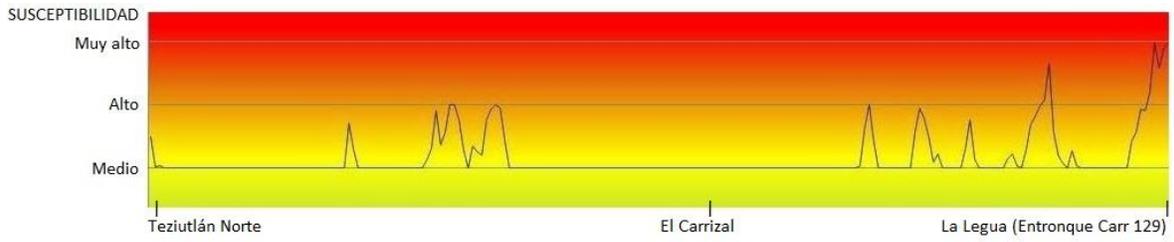


Figura 3.63: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Teziutlán-Acateno/Entronque Teziutlán-Nautla.

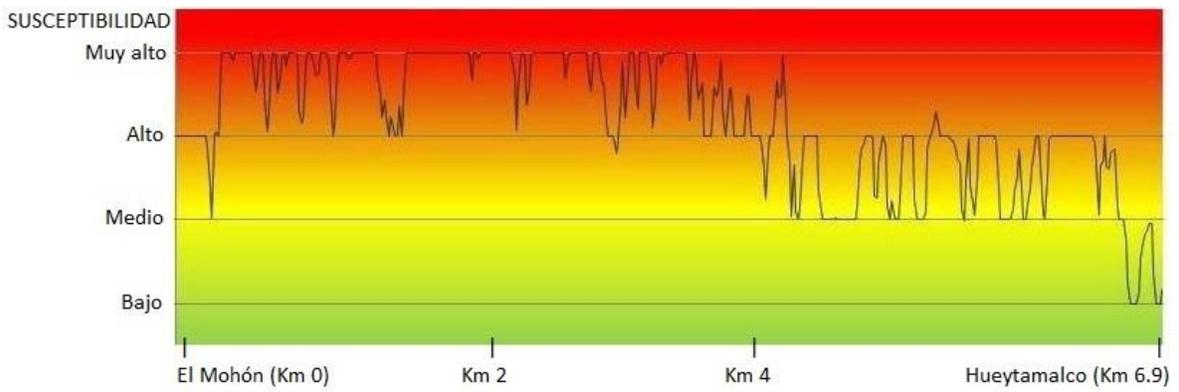


Figura 3.64: Susceptibilidad a PRM en el Ramal El Mohón-Hueytamalco.

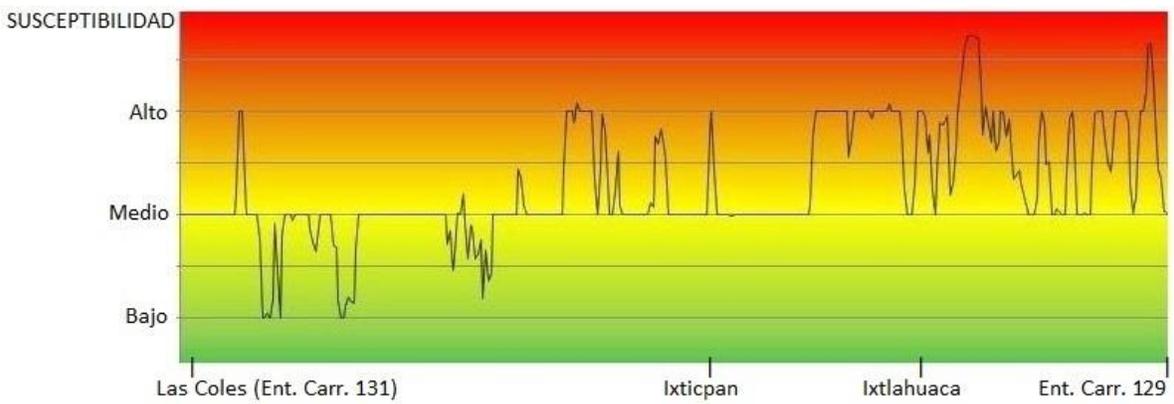


Figura 3.65: Susceptibilidad a PRM en el Libramiento Oriente de Teziutlán.

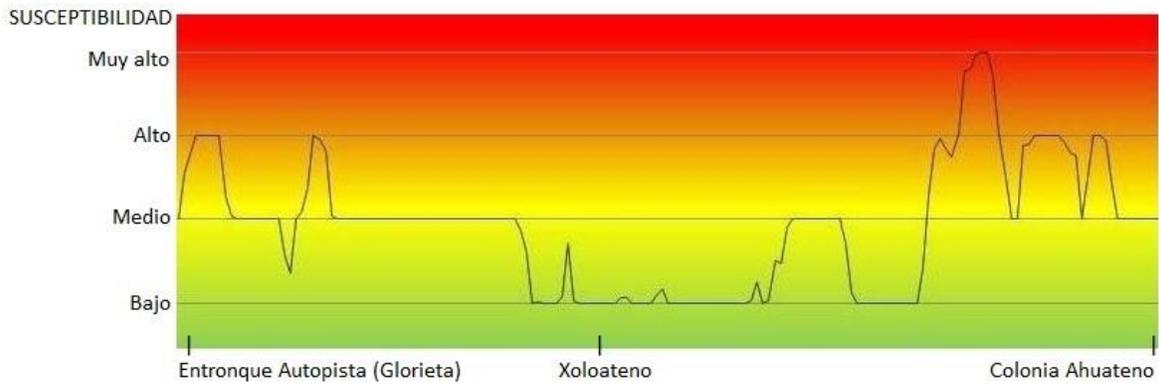


Figura 3.66: Susceptibilidad a PRM en el Circuito Juan Pablo II.

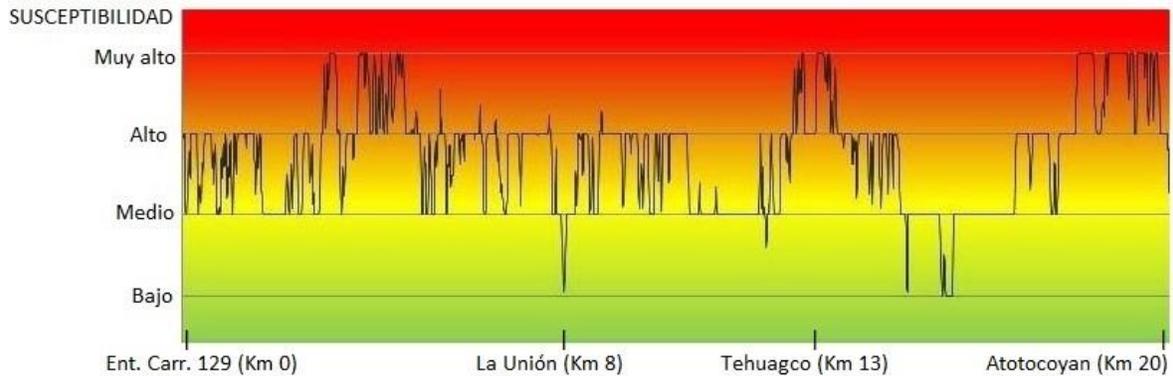


Figura 3.67: Susceptibilidad a PRM en la Carretera Entronque Amozoc-Teziutlán/Mazatepec, Tramo Tlatlauquitepec- Atotocoyan.

3.4.2 Análisis y resultados

Como ya se había mencionado en el tema 2.4.3, los resultados obtenidos por las dos metodologías son semejantes en general con respecto a las zonas o tramos con un grado muy alto de susceptibilidad a procesos de remoción, salvo 2 excepciones que se distinguen notablemente al comparar los mapas de las figuras 3.34 y 3.52.

Estas 2 excepciones son tramos en los cuales los resultados se contradicen, el primero de ellos corresponde a la parte central de la ciudad de Teziutlán. Con el uso del análisis multicriterio se obtuvo que era un área con bajo grado de susceptibilidad, mientras que con el método de pesos de evidencia se obtuvo que era un área con alto grado de susceptibilidad. Sin embargo, de acuerdo a observaciones de campo, el análisis multicriterio fue el resultado más acertado, debido

a que los PRM se presentan en la periferia de la ciudad donde hay presencia de barrancos, mientras que el centro es una zona ausente de fuertes pendientes y barrancos. El segundo tramo en el que se contradicen los resultados, corresponde al tramo La Unión-Atotocoyan de la Carretera Tlatlauquitepec-Mazatepec que se encuentra al norte del área de estudio, ahí con el análisis multicriterio se determinó que era una zona con alto grado, y con pesos de evidencia se obtuvo que era de muy bajo grado. No obstante, observaciones de campo corroboraron un alto grado de susceptibilidad.

En los dos casos anteriores el método de pesos de evidencia no fue el más adecuado. Esto se debe a que es una técnica que se basa en el número de PRM que ocurren en un área sin tomar en cuenta la pendiente del terreno, la cual en el análisis multicriterio, y en la realidad es considerada de gran importancia. En el tramo carretero La Unión-Atotocoyan, en un principio no se hizo levantamiento de datos o inventario de PRM, ya que esta vialidad no estaba considerada para ser analizada en este trabajo, por lo que en el análisis de pesos de evidencia se indica una zona con bajo grado de susceptibilidad. Al realizarse la validación de campo, fue posible analizar el grado de certeza de los resultados.

En cuanto al resto de los tramos carreteros analizados, los resultados de ambas metodologías coinciden de manera general. De ellos, los tramos más susceptibles a PRM son:

- A) En la Autopista Puebla-Teziutlán el tramo que cruza el municipio de Tlatlauquitepec (del Km 112 al 120) y el de Chignautla (del Km 126 al 132).
- B) En la Carretera Teziutlán-Perote la zona denominada las Coles (Figura 3.68).
- C) En la Carretera Amozoc-Teziutlán los tramos próximos a la ciudad de Tlatlauquitepec.
- D) En la Carretera Teziutlán-Nautla el tramo comprendido entre La Legua y El Mohón.
- E) En el Ramal a Hueytamalco del Km 0 al 5 (Figura 3.69).
- F) En la localidad de Aire Libre.
- G) En la localidad de Atotocoyan (Figura 3.70)
- H) En las vialidades que se encuentran en la periferia de la ciudad de Teziutlán.



Figura 3.68: Carretera Teziutlán-Perote, Km. 5, Las Coles.



Figura 3.69: Muro de contención en Km. 4 del Ramal a Hueytamalco.



Figura 3.70: Proceso de remoción en masa en Atotocoyan.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.

La elaboración del mapa de susceptibilidad por medio de los 2 métodos utilizados en este trabajo permitió conocer sus características, ventajas, desventajas y precisión de los resultados; en este caso el “análisis multicriterio” fue el método que permitió crear un modelo más cercano a la realidad y fue más apto para la escala de trabajo.

El método de “pesos de evidencia” es una herramienta que requiere tener un mayor número de muestras del fenómeno que se estudia y datos geográficos más detallados para obtener resultados más acertados. Además cabe destacar que con el transcurso del tiempo y la ocurrencia de nuevos eventos, los resultados pueden cambiar considerablemente.

El detalle o escala de los datos geográficos fue fundamental, ya que de ellos dependió la exactitud de los resultados.

Con respecto al inventario de PRM, este puede ser ampliado y utilizado para futuros trabajos relacionados al tema y zona de estudio. Los tipos de PRM que más se presentan en la zona de estudio son los deslizamientos con un total de 104, en segundo lugar son las caídas con 15 y en menor número hay 3 flujos y 1 movimiento complejo.

Los factores o elementos que más importancia adquirieron en esta investigación, fueron la pendiente y el tipo de litología, por lo que es recomendable siempre utilizar estos elementos para cualquier estudio relacionado a la inestabilidad de laderas. En cuanto a la orientación de la ladera y el tipo de suelo, tuvieron muy poco peso o influencia, por lo tanto pueden ser remplazados por otros factores o aspectos como el porcentaje de cubierta vegetal, distancia a ríos, la morfogénesis, la precipitación, entre otros.

Es importante destacar el uso de los sistemas de información geográfica y la percepción remota en este tipo de trabajos relacionados con elementos o fenómenos que se distribuyen en determinado territorio, sin embargo siempre debe ser necesario estar respaldado por el trabajo de campo para corroborar las posibles incongruencias que puedan surgir en la elaboración de la cartografía.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el 44.17% (análisis multicriterio) y el 51.68% (pesos de evidencia) de las vialidades de toda la zona de estudio son muy susceptibles a tener afectaciones

causadas por los PRM, mientras que únicamente el 13.9% y 30.7% respectivamente, están exentas de sufrir daños; esto quiere decir que todas las localidades de la zona, están expuestas a quedar incomunicadas en caso de la ocurrencia de un desastre, pues las carreteras no cuentan con medidas de mitigación adecuadas. Las principales vías de comunicación, la autopista y 3 carreteras federales, poseen zonas que están clasificadas con muy alto grado de susceptibilidad a PRM; dado esto, es de suma importancia que las autoridades responsables de dichas vialidades tomen medidas preventivas para mitigar posibles daños en eventos futuros, pues actualmente estas medidas se toman después de que ocurrió un evento o desastre.

La existencia de las carreteras, en particular la autopista (129D), ha provocado el incremento de la ocurrencia de los PRM debido que fue construida en material muy inestable y al corte de laderas que se realizó en su construcción, Actualmente dicha vialidad se tienen registrados 20 procesos de remoción y tiene 13 zonas potenciales a que ocurra un movimiento de ladera.

Los PRM son fenómenos naturales que se han ido intensificando por la influencia de las actividades antrópicas, han causado múltiples desastres en muchos países incluyendo México y siempre van a estar presentes, por lo que los métodos planteados en esta tesis pueden sentar algunas bases para posteriormente desarrollar trabajos, acciones y medidas preventivas en otras regiones que presentan la misma problemática, esto con el propósito de evitar daños no solo a la infraestructura carretera (el cual es un elemento fundamental para cualquier país, región o localidad), también se puede tomar en cuenta infraestructura de servicios, sectores productivos y sectores sociales.

BIBLIOGRAFÍA

- Aceves, F. (2007), *Mapa de riesgo volcánico basados en sistemas de Información Geográfica: Volcán Nevado de Toluca* Tesis de doctorado, Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Alcántara-Ayala, I. (2000), "Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología". *Investigaciones Geográficas*, Boletín del Instituto de Geografía Núm. 41, UNAM, México, pp. 9-25.
- Alcántara-Ayala, I. (2009), "Los Sistemas de Información Geográfica en la prevención de desastres: realidad y perspectivas" *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*, Geografía para el Siglo XXI, UNAM, México, pp. 149-163.
- Alcántara-Ayala, I., Echavarría-Luna, A., Gutiérrez, C., Domínguez, L. y Noriega, I. (2001), *Inestabilidad de laderas*. Serie Fascículos, CENAPRED, México, 36 p.
- Aronoff, S. (1989), *Geographic Information Systems: a management perspective*, WDL Publications, Ottawa, Canadá, 294 p.
- Audemard F. A. y Singer A. (2002), "El alud torrencial de 6 septiembre de 1987 en la cuenca del Río El Limón, al norte de Maracay, Venezuela Septentrional", *Desastres Naturales en América Latina*, Fondo de Cultura Económica, pp. 385-408.
- Backhoff P., M.A. (2002), *El Sistema de Información Geoestadística para el Transporte. Desarrollo y aplicaciones Multitemáticas*. Tesis de maestría. Facultad de Filosofía y Letras, División de Estudios de Posgrado, UNAM. México.
- Bitrán, D. (2001), *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99*. Serie Impacto Socioeconómico de los desastres en México, núm. 1, Centro Nacional de Prevención de Desastres, México. 108 p.
- Bonham-Carter, G.F. (1994), *Geographic Information Systems for Geoscientists: Modeling with GIS*. Pergamon Press, Canada.
- Bonham-Carter, G.F. (2002), "Geographic information systems for geoscientist: modeling with GIS" *In: Merriam, D.F. (Ed.), Computer Methods in the Geosciences*. Pergamon/Elsevier, New York, pp. 302-334.
- Borja-Baeza, R. C. y Alcántara-Ayala, I. (2009), "Susceptibility to mass movement processes in the municipality of Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla", *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía Núm. 73*. UNAM. México. pp. 7-21.
- Borja-Baeza, R. C., O. Esteban-Chávez, J. Marcos-López, R. J. Peña-Garnica y I. Alcántara-Ayala (2006), "Slope instability on pyroclastic deposits: landslide distribution and risk mapping in Zacapoxtla, Sierra Norte de Puebla, Mexico", *Journal of Mountains Science*, vol. 3, no. 1, pp 1-19.

- Brusden, D. (1979), *Slope Instability*. Landscape systems: a series in geomorphology, UK, 620 p.
- Budetta, P., A. Santo y F. Vivencio (2008), "Landslide hazard mapping along the coastline of the Cilento region (Italy) by means of a GIS-based parameter rating approach", *Geomorphology*, vol. 94, pp. 340-352.
- Burrough, P.A. (1987), *Principles of Geographic Information System for Resources Assessment*. Oxford University Press. Inglaterra.
- Caloni, N. (2010), "Análisis Espacial de Evaluación Multicriterio en la Generación de Alternativas Viales para el Trazado de la Autopista Luján-Mercedes" *Geografía y Sistemas de Información. Aspectos Conceptuales y Aplicaciones*, Universidad Nacional de Luján, Argentina, pp. 487-519.
- Castellanos-Abella, E. A y C. J. Van Westen (2008), "Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: a case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba", *Geomorphology*, vol. 94, pp. 453-466.
- CENAPRED (2006), *Características e impacto socioeconómico de los huracanes "Stan" y "Wilma" en la República Mexicana en el 2005*, Secretaria de Gobernación, México, 318 p.
- Chen, K., R. Blong y C. Jacobson (2001), "MCE-RISK: integrating multicriteria evaluation and GIS for risk decision-making in natural hazards", *Environmental modeling and software*, vol. 16, no. 4, pp. 387-397.
- Ching Jianye y Liao Hung J. (2006), "Predicting landslides probabilities along mountain road in Taiwan", *International Symposium on New Generation Design Codes for Geotechnical Engineering Practice*, Taipei, Taiwan, pp. 1-11
- Choi, J. y Lee, S. (2004), "Landslide susceptibility mapping using GIS and the weight of evidence model". *International Journal of Geographical Information Science*. Vol. 18, Núm. 8. Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) Korea . pp. 789-814.
- Chuvieco, E. (1990), *Fundamentos de Teledetección Espacial*, Serie: Geografía y Ecología, España, 453 p.
- Coates. D.R. (1977), "Landslide perspectives", in Coates, D R. (ed.), *Landslides*, Geological Society. of América.
- Cocquerez, J. P. y Philipp S. (1995), *Analyse d'images: filtrage et segmentation*, Ed. Masson.
- Cowen, D. J. (1988), "GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences?", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, pp. 1551-1554.
- Crespo, C. (2004), *Vías de Comunicación: Caminos, Ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos*. Editorial Limusa, México. 730 p.

- De Pedraza Gilsanz J. (1996), *Geomorfología: Principios, Métodos y Aplicaciones*. Editorial Rueda, Madrid, España. 414 p.
- Díaz, J. (2010), *Reseña de la tormenta tropical "Matthew" del Océano Atlántico*, SEMARNAT, Comisión Nacional del Agua, México, 9 p.
- Díaz-Salgado, J. (1998), *Evaluación del potencial acuícola costero mediante la aplicación de un sistema de información geográfica: dos estudios caso en Oaxaca y Chiapas*, tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- DoE (1987), *Handing Geographic Information*, Department of the Environment, HMSO, London.
- Douglas, I. (1977), *Humid Landforms*. The MIT Press. Cambridge, 288 p.
- Dueker K. J. (1979), "Land resource information systems: a review of fifteen years experience" , *Geo-processing*, núm. 1, pp. 105-128.
- EPOCH (European Community Programe; 1993), *Temporal occurrence and forecast of landslides in European Community*, Flageollet, J. C. (ed.) 3 volumes, Contract 90 0025.
- Flores, P. y Alcántara-Ayala, I. (2002), "Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla". *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía Núm. 49*. UNAM. México. pp. 7-26.
- García, M. G. (2003), *Sistema de Información para el Análisis Espacial de Riesgos en la Red Nacional de Carreteras*. Tesis de maestría. Facultad de Filosofía y Letras, División de Estudios de Posgrado, UNAM. México. 322 p.
- Garizureta, M., Sola C. y Barinagarrementeria, M. D. (2006), *Geografía y medio ambiente*. España. 166 p.
- Garza, M. y Rodríguez-Velázquez D. (2001), *Los desastres en México. Una perspectiva multidisciplinaria*. Universidad Iberoamericana A.C. México. 151 p.
- Geneletti, D. (2007), "An approach based on spatial multicriteria analysis to map the nature conservation value of agricultural land" *ELSEVIER*, Pp. 228-235.
- Glade, T. (2003), "Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand", *Catena*, no. 51, pp. 297-314.
- Hansen, A. (1984), "Landslide hazard analysis", in Brunsden, D. y D. Prior D., *Slope instability*, pp. 553-595.
- Harmon, J. E. y Anderson S. J. (2003), *The Design and Implementation of Geographic Information Systems*. John Wiley y Sons, Inc., USA, 264 p.

- Hernández-Unzón, A y Cirilo, M. (2005), *Resumen del Huracán Stan del Océano Atlántico*, Comisión Nacional del Agua, Servicio Meteorológico Nacional, México, 4 p.
- Horton, R. E. (1945), "Erosional Development of Streams and their Drainage Basins", *Bull. Geol. Soc. Am.*, pp. 275-370.
- Hurn, J. (1989), *GPS A guide to next utility*, Trimble Navigation, USA, 76 p.
- Hutchinson, J. N. (1988), "General report morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrogeology", *Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides*, Netherlands, vol 1, pp. 3-35.
- INEGI (1984), *Carta Edafológica Hoja Veracruz E14-3 escala 1: 250 000*, Secretaria de Presupuesto y Programación, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (2004), *Guía para la Interpretación de Cartografía Edafología*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México 29 p.
- INEGI (2005), *Carta Topográfica Hoja Altotonga E14-B16 escala 1: 50 000*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- INEGI (2008), *Carta Topográfica Hoja Teziutlán E14-B15 escala 1: 50 000*, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, México.
- IUSS (2007), *Base Referencial Mundial del Recurso Suelo*. Grupo de Trabajo WRB. Primera actualización 2007. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. International Union of Soil SciencesFAO, Roma.
- Jaithish, J. (2010), "*Landslide Occurances at Maierato, Italy. AnEngineering Geological View*" Universidad de Pensilvania 57 p.
- Komac, M. (2006), "A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia", *Geomorphology*, vol. 74, pp 17-28.
- Lewis, S. y Fletcher, D. (1991), "An introduction to GIS for Transportation". *Transportation Research Board*. Annual Conference, Washington, D. C.
- Lindenlaub, J. C. (1976), *Remote Sesing: What is it?, Fundamentals of Remote Sensing*, Purdue Research Foundation.
- Lugo-Hubp, J. (1991), *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos)*, Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F. 128 p.
- Maskrey, A. (1993), *Los desastres no son naturales*. Red de Estudios Sociales en Prevención de desastres en América Latina. La Red. 137 p.

- Murillo-García y Alcántara-Ayala, (2008), "Procesos de Remoción en Masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional", *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía Núm. 66*. UNAM. México. pp. 47-64.
- Niezen, C. (2001), *La silenciosa revolución del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). Señales del cielo*, PC Word, Perú.
- OEA (1991), *Desastre, planificación y desarrollo: manejo de amenazas naturales para reducir los daños. Una Contribución al Decenio Internacional para la reducción de Desastres Naturales*, departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente, OEA, 61 p.
- Ozemoy, V. M., D. R. Smith y A. Sicherman (1981), "Evaluating computerized geographic information systems using decision analysis", *Interface 11*, pp. 92-98.
- Parise, M. (2000), "Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard", *Phys. Chem. Earth*, vol. 26, no. 9, pp. 697-703.
- Parker, H. D. (1988), "The unique qualities of Geographic Information System: a comentary", *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, pp. 1547-1549
- Peet, F. G. y Sahota, T. S. (1985), "Surface curvature as a measure of image textutra", *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, pp. 734-738.
- Penck, A. (1894), *Morphologie der Erdobefflache*, 2 vols.. 471 and 696.
- Pérez-Rojas, A. Marquéz, A. González, R. y Comas, O. (2006), *Manual de Prácticas de Laboratorio de Geología*. Universidad Autónoma Metropolitana, México, 120 p.
- Philipp, S. y Smadja, M. (1994), "Approximation of granular textures by cuadratic surfaces" *Pattern recognition*, pp. 1051-1063.
- Preciado-López, J. L. (2007), *Análisis de riesgo en la región de la Sierra Norte de Puebla: el papel de la vulnerabilidad y la inestabilidad de laderas*, tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México, 106 p.
- Priego-Santander, A.G. Isunza-Vera, E. Luna N. y Pérez-Damián J. L. (2003), "Método para realizar Mapa de Disección Vertical" *Propuesta para generación de unidades de paisajes*, Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, pp. 73-80.
- Quintero J. A. (2009), "Definición y origen de los sistemas de Información geográfica" *Conceptos de Geomatica y estudios de caso en México*, Geografía para el Siglo XXI, UNAM, México, pp. 115-147.
- Regmi, N. R. Giardino, J. R. Vitek J. D. (2010), "Modeling susceptibility to landslides using the weight of evidence approach: Western Colorado, USA" *Geomorphology*, Dept. of Geology and Geophysics, Texas, University, College Station, USA. , pp. 172-187.

- Rib, H., T., y Liang, T. (1978), "Recognition and Identification. R.L. Schuster (Ed.)" *Landslides: Analysis and control - Special Report 176*. National Academy of sciences, Washington DC, pp. 34-48.
- Saaty, T. L. (1984), *Décider face à la complexité*, Ed. Entreprise Moderne d'Édition, Paris.
- Savigear, R. A. G. (1952), "Some observations on slope development in South Wales", *Transactions of the Institute of British Geographers*, 18 pp. 31-51.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte (1996), *Criterio para jerarquizar la conservación de carreteras con base a su importancia económica*. Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México. 105 p.
- Servicio Geológico Mexicano (2010), *Carta Geológico Minera Teziutlán E14-B16*.
- Servicio Geológico Mexicano (2011), *Carta Geológico Minera Teziutlán E14-B15*.
- Sharpe C., F.S. (1938), *Landslides and related phenomena*, Columbia University Press, New York.
- Skempton, A. W. y J. N. Hutchinson (1969), "Stability of natural slopes and embankment foundations", *Proceedings of the Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. State of Art Volume, Mexico. pp. 291-340.
- Smith, T. R., Menon, J. L. Starr y J. E. Estes (1987), "Requirements and principles for de implementation and construction of large scale geographic information systems", *International Journal of Geographical Information Systems*, no. 1, pp. 13-31.
- Soldano A. (2009), *Conceptos sobre riesgo*. Córdoba, Argentina.
- Strahler, A. N., (1952), "Dynamic basis of geomorphology", *Bull. Geol. Am.*, pp. 923-938.
- Suaréz, D. J., (1998), "Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales" UIS, Colombia, 540 p.
- Terzaghi, K. (1950), "Mechanisms of landslides", *Geol. Soc. Am.*, Berkeley Volume, pp. 83-123.
- Tomlinson, R. F. (1990), "Geographic Information Systems a new frontier", *Introductory readings in Geographic Information Systems*. Taylor y Francis, Inglaterra, p.p. 18-29.
- UNISDR. (2009), *Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres*, Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres, ONU, Ginebra, Suiza. 38 p.
- USGS (2008), *The Landslide Handbook: A Guide to Understanding Landslides*, The United States Geological Survey, 129 p.

Varnes, D. J. (1958), "Landslides types and processes", in Eckel, E. B. (ed.), *Landslides and Engineering Practice*. Highway Res. Board Special Report 29, pp. 20-47.

Varnes, D. J. (1978), "Slope movements, types and processes", *Landslides: Analysis and control, transportation research board*, Spec. Rep. 176, pp. 11-33

Yalcin, A. (2008), "GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations", *Catena*, no. 72, pp 1-12.

Zevallos-Moreno O. (1994), *Lecciones del deslizamiento "La Josefina"*, Ecuador, Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres Colombia, 13 p.

MESOGRAFÍA

Arriola-Bernave, H. (2012), "Se reportan deslaves en Tlatlauquitepec y Teziutlán", Noticias de Teziutlán, La Pura Verdad, 10 de agosto. [<http://noticiasteziutlan.blogspot.mx/2012/08/deslaves-en-teziutlan-por-fuertes.html>].

Diario de Teziutlán, (2011), "Lluvias dejan deslaves en carreteras y pista" 8 de septiembre. [<http://diariodeteziutlan.blogspot.mx/2011/09/lluvias-dejan-deslaves-en-carreteras-y.html>].

Comité Técnico de Estadística y de Información Geográfica del Estado de Puebla (2010), "Mapas Regionales" [<http://www.coteigep.pue.gob.mx/>].

Franco, X. y Valdivia I. (s/f), "Algunas consideraciones sobre los estudios de la estructura de la estructuración del sistema de asentamientos como base para la formulación de sistema de servicios socio-culturales", [<http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx>].

INAFED (1998), *Enciclopedia de los Municipios de México Puebla*. Centro Nacional de Desarrollo Municipal, Gobierno del Estado de Puebla. México. [<http://www.inafed.gob.mx>].

INEGI, (2011), Red Hidrográfica escala 1:50 000 edición 2.0, [<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reconat/hidrologia/Descarga.aspx>].

INEGI, (2012), Conjunto de Datos Vectoriales de la Serie Topográfica y de Recursos Naturales, escala 1:1 000 000, [<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/topografia/default.aspx>]

INEGI, (2013), Conjunto de Datos Vectoriales de la Serie Topográfica escala 1:50 000 [<http://www3.inegi.org.mx/sistemas/biblioteca/detalle2.aspx>].

Noticias de Puebla, (2010) "Karl provoca dos muertos, 17 derrumbes e inundaciones en Puebla" 17 de septiembre. [www.e_consulta.com/index.php?option=com_content&task=view&id=58973&Itemid=285].

Núñez M. y Medrano J. C. (2010), "Derrumbe en Tlahuitoltepec". [http://tlahuiayujuk.blogspot.mx/2010/09/derrumbe-en-tlahuitoltepec_29.html].

Petley D. (2010), *"The mechanism of the Highway 3 landslide in Taiwan"*, 26 de abril. [www.landslideblog.org].

Post R. (2010), *"Landslide Covers Freeway, Kills at Least 4 in Taiwan"*, 29 de abril. [www.geoprac.net/geonews].

Rodríguez, O. (2010), *"Decretan alerta roja en Teziutlán por paso del huracán Karl"*. *Noticias de Puebla*. [http://www.e-consulta.com].

[http://www.arcgis.com/home/item.htm].

[http://www.cenapred.unam.mx].

[http://www.eluniversal.com.mx/notas/712033.html] (2010) *"Desgajamiento sepulta unas 300 casas en Oaxaca"*, 28 de septiembre.

[http://www.nasa.gov].

[http://www.news24.com] (2010) *"Taiwan landslide buries highway"*, 26 de abril.

[http://www.tesis.ufm.edu.gt/fisicc/2004/75145/Cap%C3%ADtulo%201.htm#uno_dos].

[http://www.topos.mx/11-operativos/71-derrumbe-queretaro-mexico-26-de-mayo-2013] (2013) *"Derrumbe Querétaro- México"*, 26 de mayo.

[http://www.unionjalisco.mx/articulo/2013/05/27/seguridad/mexico-queretaro-capufe-asegura-que-atendio-tuit-que-advertia-deslave].