



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

POSGRADO EN GEOCIENCIAS APLICADAS

**ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD POR PROCESOS
DE REMOCIÓN EN MASA, EN LA SUBCUENCA DEL RÍO
SAN MARCOS, SIERRA NORTE DE PUEBLA, MÉXICO.**

Tesis que presenta

María Rosaira Cruz Mateo

Para obtener el grado de

Maestra en Geociencias Aplicadas

Dr. Pablo Dávila Harris (Director)

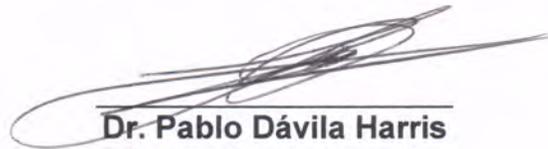
Dra. Cristina Noyola Medrano (Co-directora)

San Luis Potosí, S.L.P., julio de 2015



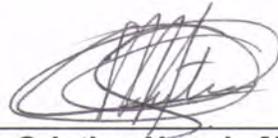
Constancia de aprobación de la tesis

La tesis "**Análisis de la susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la subcuenca del río San Marcos, Sierra Norte de Puebla, México**" presentada para obtener el Grado de Maestro en Geociencias Aplicadas fue elaborada por **María Rosaira Cruz Mateo** y aprobada el **quince de julio del dos mil quince** por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.



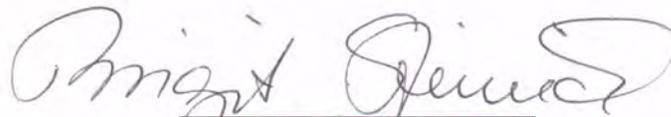
Dr. Pablo Dávila Harris

Codirector de la tesis



Dra. María Cristina Noyola Medrano

Codirector de la tesis

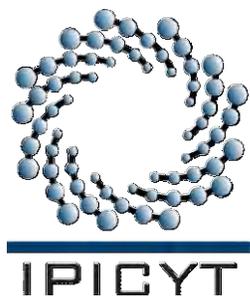


Dra. Birgit Steinich

Miembro del Comité Tutorial

Dr. José Alfredo Ramos Leal

Miembro del Comité Tutorial



Créditos Institucionales

Esta tesis fue elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., bajo la dirección de los Doctores Pablo Dávila Harris y Cristina Noyola Medrano.

Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (288332) y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.



Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 007 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Maestría en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 15 días del mes de julio del año 2015, se reunió a las 17:10 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

Dra. Birgit Steinich	Presidenta	IPICYT
Dra. María Cristina Noyola Medrano	Secretaria	UASLP
Dr. Pablo Dávila Harris	Sinodal	IPICYT

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

MAESTRA EN GEOCIENCIAS APLICADAS

sustentó la C.

María Rosaira Cruz Mateo

sobre la Tesis intitulada:

Análisis de la susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la subcuenca del río San Marcos, Sierra Norte de Puebla, México

que se desarrolló bajo la dirección de

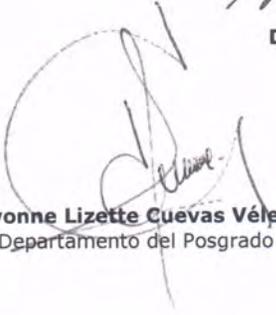
Dr. Pablo Dávila Harris
Dra. María Cristina Noyola Medrano (UASLP)

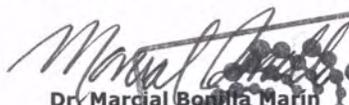
El Jurado, después de deliberar, determinó

APROBARLA

Dándose por terminado el acto a las 18:35 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición de la interesada y para los fines que a la misma convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 15 días del mes de julio de 2015.


Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez
Jefa del Departamento del Posgrado


Dr. Marcial Bonilla Marín
Secretario Académico


INSTITUTO POTOSINO
DE INVESTIGACIÓN
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.

IPICYT
SECRETARIA ACADEMICA

A mi familia fuente de apoyo constante e incondicional en toda mi vida.

A mis padres:

Amalia Mateo

Ramiro Cruz.

A mis hermanos:

Senaida, María, Paulina, Elizabeth, Ramiro, Jorge y Encarnación.

A mis sobrinos:

Fernanda, Camila, Sofía, Miranda, Alejandro, Luís, Enrique y César, porque ustedes hacen de mi vida aún más divertida y feliz.

Agradecimientos

A mis padres, por su apoyo, amor, trabajo y consejos; muchos de mis logros se los debo a ustedes. Me formaron con reglas y con algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis metas.

A mis hermanos, por sus palabras, complicidad y compañía.

A mis tíos (a): Elena, Martha, Josefina y Benjamín, por sus consejos y cariño.

A la Dra. Cristina Noyola Medrano, por ser una de mis guías y apoyo en éste trabajo, por su amistad, palabras de motivación y tener siempre el tiempo disponible para atenderme.

Al Dr. Pablo Dávila Harris, por compartir sus conocimientos, manera de trabajar, por sus correcciones persistentes que me han ayudado a crecer profesionalmente, por orientarme y apoyarme en éste trabajo.

A la Dra. Birgit, por sus clases impartidas que me dejaron grandes enseñanzas y lecciones, por tener siempre la disposición de ayudarme a resolver mis dudas académicas.

Al Dr. Alfredo Ramos, por su amistad, solidaridad y disposición de apoyarme en este trabajo.

Al Dr. José Tuxpan, por su disposición de apoyarme en mis dudas académicas.

A mis amigos (a) entrañables: Ángeles Martínez, Angelina Candia, Claudia Rigel Peredo, Nereida de la Paz Pérez, Alejandro Cruz Rosas y Jesús Galván, con los que he compartido grandes momentos y por estar siempre a mi lado, sin duda hicieron mucho más fácil, divertida y agradable mi estancia en San Luis potosí.

A mis amigos y compañeros: Gabriela Pérez Assaf, Sonia Torres, Manuel Piña, Antonio de Jesús Lara, Don César Berzoza, Simón Eduardo Carranco, Mauricio España, Christian Aguilar, Jafet García, Vicente Hernández, Mariana Citlalli Barrientos, Jorge Paz Tenorio, Zenón Rizo, Roberto Alonso, quienes con su apoyo, consejos, cariño y conocimientos han enriquecido ésta etapa de mi vida.

Al Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), por el apoyo brindado durante la maestría.

Al Centro Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada.

A la División de Geociencias Aplicadas, por permitirme realizar mis estudios de maestría.

A todos ustedes muchas gracias .

Contenido

Constancia de aprobación de la tesis	ii
Créditos institucionales	iii
Acta de examen	iv
Dedicatorias	v
Agradecimientos	vi
Contenido	vii
Lista de figuras	x
Lista de tablas	xiii
Anexos	xv
Resumen	xvii
Abstract	xviii

CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general.....	3
1.2.2. Objetivos particulares	3
1.3. Antecedentes	4
CAPÍTULO II: PRINCIPIOS DE MORFOMETRÍA DE CUENCAS Y PROCESOS DE REMOCIÓN DE MASA	11
2.1. Generalidades de una Cuenca.....	11
2.1.1. Morfometría de la cuenca	12
2.2. Aspectos generales de una ladera.....	12
2.3. Generalidades de los procesos de remoción en masa (PRM).....	15
2.3.1. Tipos de procesos de remoción en masa	16
2.4. Descripción de los factores condicionantes y desencadenantes de los procesos de remoción en masa	19
2.4.1 Factores Internos	19
2.4.2. Factores externos	20
2.5. Factores condicionantes y desencadenantes analizados para la subcuenca del río San Marcos	22
2.6. Generalidades de los sistemas de información geográfica (S.I.G).....	23
2.6.1. Definición de los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G)	23

2.6.2. Los sistemas de información geográfica en los procesos de remoción en masa	24
2.7. Percepción remota en los estudios de procesos de remoción en masa	25
2.8. Terminología y conceptos usados en el campo de deslizamiento de laderas	25
2.9. Mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa.....	27
2.10. Métodos de mapeo de áreas susceptibles a procesos de remoción en masa.	28
CAPITULO III. CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO FÍSICO DEL ÁREA DE ESTUDIO	30
3.1. Localización	30
3.2. Población	31
3.3. Marco geológico regional	32
3.4. Geología de la subcuenca San Marcos	34
3.4.1. Estratigrafía	35
3.5 Geomorfología	40
3.6 Clima.....	41
3.7 Vegetación	43
CAPITULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS	44
4. 1. Descripción de los materiales	45
4.1.1. Carta Geológica.....	45
4.1.2. Cartografía Vectorial	45
4.1.3. Modelos digitales de elevación (DEM).....	46
4.1.4. Imagen satelital Landsat TM 5.....	46
4.1.5. Datos de precipitación	47
4. 2. Descripción de los métodos	48
4.2.1. Análisis morfométrico de una subcuenca	48
4.2.3. Mapa de pendientes	52
4.2.4. Mapas de precipitación anual (1998-1999).....	53
4.2.5. Mapa de precipitación máxima mensual-Octubre 1999	55
4.2.6. Mapa hipsométrico.....	56
4.2.7. Procesado de imágenes Satelitales.....	57
4.2.8. Mapa de usos de suelo y vegetación.....	59

4.2.9. Identificación, mapeo y elaboración de cartografías de los procesos de remoción en masa (PRM).....	61
4.2.10. Selección del modelo para la zonificación de susceptibilidad por PRM en la subcuenca del río San Marcos.....	62
4.2.11. Aplicación del modelo heurístico de Mora y Vahrson (1994) modificado por Mora y colaboradores (2002).....	64
4.2.12. Validación del modelo.....	65
CAPÍTULO V. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.....	65
5.1 Índice morfométrico de la subcuenca San Marcos.....	66
5.2. Índice morfométrico de la subcuenca Tehuantepec y su similitud con la zona de estudio	69
5.3. Identificación y mapeo de los Procesos de remoción en masa.....	73
5.4. Análisis de los factores condicionantes y del factor desencadenante.....	74
5.4.1. Pendiente.....	74
5.4.2 Litología	77
5.4.3 Precipitación anual de los años 1998-1999	79
5.4 .4 Hipsometría	82
5.4.5 Precipitación máxima mensual- Octubre 1999	83
5.5 Zonificación de Susceptibilidad por procesos de remoción en masa.....	85
5.6. Validación	89
5.7. Discusión de los resultados	98
5.7.1 Análisis de la morfometría de las subcuencas.....	98
5.7.2 Mapa de susceptibilidad por PRM en la subcuenca del río San Marcos	99
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.....	105
Referencias.....	110
Anexos.....	123

Lista de figuras

Figura 2.1. Nomenclatura de una ladera, tomado de Suárez (1998).....	133
Figura 2.2. Partes de un deslizamiento (modificado de USGS, 2008; Suárez, 1998)	15
Figura 3.1. Ubicación geográfica de la subcuenca del río San Marcos.....	32
Figura 3.2. Población dentro de la subcuenca San Marcos (INEGI, 2010).....	33
Figura 3.3. Provincias fisiográficas que integran la Sierra Norte de Puebla.....	35
Figura 3.4. Columna estratigráfica de la zona de estudio, compilada y modificada del SGM (1997,2004).	37
Figura 3.5. Vista en perspectiva de un sector de la subcuenca San Marcos, mostrando la geomorfología escarpada y montañosa con valles fluviales en las partes bajas (tomado de Google Earth, 7-3-2012).....	42
Figura 3.6. Mapa de climas de la subcuenca San Marcos, (INEGI, 2010).	43
Figura 3.7. Mapa de Vegetación de la subcuenca San Marcos (INEGI, 2010).....	45
4.1. Identificación de los procesos de remoción en masa, sobre las imágenes de Google Earth de fecha (7-3-2012).	62
Figura 5.1. Forma de la subcuenca San Marcos, obtenido mediante imágenes Landsat TM 5. Resolución espacial de 30 m.	68
Figura 5.2. Red de drenaje de la subcuenca San Marcos, obtenido mediante un DEM de 30m de resolución.	69
Figura 5.3. Figura 5.3. Graficas de comparación de los índices morfométricos de las subcuencas.	73
Figura 5.4. Localización de los movimientos de terreno sobre las imágenes de fecha (7-3-2012) trabajadas en Google Earth.....	74
Figura 5.5. Mapa de pendientes, muestra valores y clases de acuerdo a la susceptibilidad por PRM del terreno, se observa que la parte central-noroeste son zonas muy abruptas que corresponden a pedientes > 20° (de medio, fuerte y hasta muy fuerte).	76

Figura 5.6. Mapa litológico clasificado de acuerdo a diversas características del material.(Jurásico inferior (Ji), Júrasicio Medio (Jm), Jurásicio superior (Js), Cretácico inferior (Ki), Cretásico superior (Ks), Triásico superior (Ts)).	79
Figura 5.7. Mapa de precipitación anual (1998) con clases y valores, donde se muestra que la mayor concentración de precipitaciones se ubica en la parte centro-noroeste de la subcuenca.	81
Figura 5.8. Mapa de precipitación anual (1999), donde se muestra que la mayor concentración de precipitaciones se ubica en la parte centro-noroeste de la subcuenca.	81
Figura 5.9. Mapa de hipsometría con valores y clases, denota la orografía y distribución de los desniveles topográficos de la subcuenca San Marcos, obtenido del MDE de resolución espacial de 30 m.	82
Figura 5.10. Mapa de precipitación máxima del mes de octubre del año 1999, donde se muestra que la parte central de la subcuenca reporta una mayor acumulación de agua de lluvia.	85
Mapa 5.11. Mapa de zonificación a la susceptibilidad por procesos de remoción en masa, obtenido mediante la combinación cualitativa de mapas: litología, pendientes, hipsometría, precipitación acumulada anual (1999) y precipitaciones máximas.	87
Figura 5.12. Niveles de susceptibilidad por PRM y sus áreas en porcentaje.	87
Figura 5.13. Cartografía de áreas críticas, muestran movimientos de terreno identificados sobre imágenes de satélite de fecha (7-3-2012), visualizadas en Google Earth, mismas validan cualitativamente el mapa de susceptibilidad obtenido mediante la combinación de los diversos parámetros. (Ver anexo para una mayor visualización de las fotografías).	88
Figura 5.14. Cartografía de áreas críticas, donde se muestra con fotografías (extraídas de la base de datos de Google Earth), los movimientos de terreno en la subcuenca San Marcos. Mismas validan cualitativamente el mapa de susceptibilidad. Fotografías tomadas de Google Earth y notas periodísticas. (Ver anexo para descripción de fotografías y fuente).	91
Figura 5.15. Cartografía de áreas estables de la zona de estudio, obtenido mediante imágenes de satélite en Google Earth de fecha (1-19 2014).	92
Figura 5.16. Cartografía de áreas estables, muestra con fotografías la geomorfología de la zona oriental de la subcuenca San Marcos (Google Earth 1-19-2014). Fotografías extraídas de Google Earth.	95
Figura 5.17. Superposición de la cartografía de susceptibilidad con el mapa de procesos de remoción en masa identificados mediante imágenes de satélite. Se observa que los movimientos de laderas se localizan principalmente en los sitios clasificados como media,	

alta y muy alta susceptibilidad. Los polígonos negros representan los eventos de PRM dentro de la subcuenca San Marcos..... 97

Figura 6.1. Mapa que muestra diferentes niveles de susceptibilidad y las localidades asentadas en ellas. 100

Lista de tablas

Tabla 1.1. Los eventos más relevantes en el mundo de los años (1935-1985).....	4
Tabla 1.2. Algunos deslizamientos más recientes en el mundo, reportado en la página de www.terremotoreport.com (2013). Visitado el 25-mayo-2015.....	5
Tabla 1.3. De acuerdo con el Centro de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2004) los sucesos más relevantes de los procesos de remoción en masa en México en (1935-2007) se presenta en la siguiente tabla:	6
Tabla 2.1. Elementos de una ladera que no ha sido alterada (Suárez, 1998).....	13
Tabla 2.2. Elementos de una ladera que ya ha sufrido un cambio	14
Tabla 2.3. Clasificación de los procesos de remoción en masa de acuerdo Alcántara Ayala (2000) y USGS (2008), a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988).....	17
Tabla 4.1 Estaciones meteorológicas utilizadas, (CONAGUA, 1998, 1999).....	48
Tabla 4.2. Parámetros morfométricos calculados de la subcuenca San Marcos.....	49
Tabla 4.3. Parámetros morfométricos calculados de la subcuenca Tehuantepec.....	51
Tabla 4.4 Clasificación de la litología y valor asignado.....	52
Tabla 4.5 Clases de pendientes, condiciones del terreno, colores sugeridos y valoración del parámetro. Clasificación de acuerdo a Zuidam (1986) tomado de Mora, R. et al., (2002).....	54
Tabla. 4.6 Clasificación de la precipitación del año 1998.....	55
Tabla 4.7 Clasificación de la precipitación del año 1999.....	55
Tabla 4.8 Clasificación de las lluvias máximas mensuales, mes de octubre del año 1999	57
Tabla 4.9 Clasificación de las alturas y el nivel de susceptibilidad por procesos de remoción de masa.....	58
Tabla 5.1. Índices morfométricos de la subcuenca del río San Marcos.....	67
Tabla 5.2. Índices morfométricos de la subcuenca del río Tehuantepec.....	70

Tabla 5.3. Comparación de los índices morfométricos de las subcuencas, las cuales muestran mucha similitud entre ellos.	72
Tabla 5.4. Niveles de susceptibilidad y sus áreas, en la subcuenca San Marcos.	87
Tabla 5.5. Inventario de los movimientos de ladera localizadas mediante imágenes de satélite (en Google Earth) de fecha 7-3-2012, en la subcuenca del río San Marcos, incluye la zona, coordenadas geográficas y breve descripción.....	90
Tabla 5.6. Inventario realizado mediante fotografías en base de datos de Google Earth y notas periodísticas, en la subcuenca del río San Marcos incluye coordenadas geográficas y breve descripción de los movimientos de laderas localizadas. (Ver anexo para detalle de las fotos).....	93
Tabla 5.7. Coordenadas geográficas de las zonas estables de la subcuenca San Marcos, localizadas mediante imágenes de satélite en Google Earth de fecha (1-19-2014).....	94

Anexo

Fotografías e imágenes satelitales

- Figura 1.** Punto 3. Inestabilidad de ladera por cortes, ubicado en la localidad Mamaiquetla-Pahuatlán con coordenadas: 20°15'30.93"N 98°07'29.08"W..... 121
- Figura 2.** Punto 6. Flujo de tierra, ubicado al Cerro de Pericos, con coordenadas: 20°19'10.52"N 97°57'58.64"W..... 121
- Figura 3.** Punto 7, flujo de detrito, ubicado al este de Tlacuilotepec con coordenadas: 20°19'36.46"N 98°02'40.37"W..... 122
- Figura 4.** Punto 8-9. Deslizamiento de ladera, ubicada en la localidad de Coaxcicala, con coordenadas: 20°14'00.47"N 98°01'38.45"W. 122
- Figura 5.** Punto 12. Deslizamiento de ladera, Carretera rumbo a Tlalacruz-Pahuatlán-Cuauneutla-Tlacuilotepec, coordenadas: 20°17'51.41"N, 98°07'34.28"W..... 123
- Figura 6.** Punto 13. Deslizamiento de la ladera ubicado al oeste de San Pablito con coordenadas: 20°17'42.69"N 98°11'24.20"W. 123
- Figura 7.** Punto 14. Deslizamiento de ladera ubicado al suroeste Ozomatlán con coordenadas: 20°16'28.16"N 98°02'41.68"W. 124
- Figura 8.** Punto 1. Deslizamiento de ladera, ruta Tuxpan-Veracruz, coordenadas: 20°19'51.79"N 97°57'33.95"O. Tomado por Sergio Arce (06-10-2014). 122
- Figura 9.** Punto 2. Cortes de laderas, posible inestabilidad de taludes, ubicado al noreste de Tlapehuala, con coordenadas: 20°19'3.50"N98° 0'31.15"O. Tomado por JRW&P (20-02-2010)..... 122
- Figura 10.** Punto 3. Se observan laderas sin vegetación, posibles movimientos, ruta Tlacuilotepec, coordenadas 20°19'48.52"N 98° 3'9.24"O.Tomado por xondorfly (20-02-2011). 127
- Figura 11.** Punto 4. Se observa un deslizamiento de ladera, Carretera rumbo a Tlalacruz, coordenadas: 20°17'37.09"N 98° 7'33.30"O. Tomada por Guillermo Cercaño (13-03-2011). 126
- Figura 12, 13, 14.** Punto 5. Deslizamiento de laderas que afectó viviendas en la calle 5 de Mayo, Pahuatlán, reportado en Octubre 2007 en la página Tulancingo cultural y en septiembre de 2013, por Ánimas Vargas, con coordenadas 20°16'35.13"N 98° 9'1.56".. 127

Figura 15. Punto 6. Deslizamiento de una ladera ubicado en Cerro de los Pericos, al norte de Xicotepec de Juárez, con coordenadas: 20°19'5.17"N 97°58'24.15"O. Tomado por Larry B.J. (26-04-2013).	127
Figura 16. Punto 7. Deslizamiento de ladera ubicado en Rio Tlacuilo, al Oeste de Tlapehuala, coordenada: 20°18'58.01"N 98° 2'35.50"O. Tomado por Ángel en (22-03-2008).	128
Figura 17. Punto 8. Deslizamiento de ladera en Pahuatlán del Valle. Coordenadas: 20° 17' 6.59" N 98° 8' 17.08" W. Tomado por Gerardo Perea Nieto (11-07-2007).....	128
Figura 18. Punto 1. Relieve al norte de Chicualoque, Veracruz, coordenadas: 20°23'41.52"N 97°40'10.98"O. tomado por Leo Vásquez (08-02-2007).....	129
Figura 19. Punto 3. Col. Arroyo Florido, Veracruz, coordenadas 20°24'22.53"N97°30'38.50"O. Tomado por Enrique Cuevas (27-05-2013).	129
Figura 20. Punto 4.Coatzintla, Veracruz, con coordenadas: 20°29'15.86"N 97°29'39.36"O. tomado por Orlando-Ska. (29-03-2013)	130
Figura 21. Punto 5. Al sur de la Col. Palma Sola, Veracruz, coordenadas 20°24'33.37"N 97°33'38.14"O. tomado por liamgg (29-07-2010).	130
Figura 22. Punto 6. Al noreste de Progreso, Puebla, coordenadas: 20°27'51.85"N 97°47'58.62"O tomado por miguelangelsv (09-07-2011).....	130
Figura 23. Punto 7. Al este de Santa Rita, Xicotepec de Juárez, Puebla, coordenadas: 20°22'1.17"N 7°45'47.64"O. Tomado por Gabriel_lopez Taken on (28-03-2005).....	131
Figura 24. Punto 7. Al este de Santa Rita, Xicotepec de Juárez, Puebla, coordenadas: 20°22'1.17"N 97°45'47.64"O. Tomado por Gabriel_lopez Taken (28-03-2015).....	131
Figura 25. Caídas de rocas en la carretera Pezmatlán-Mazatepec, dejando incomunicadas siete localidades en la zona de Tlatlauquitepec, ubicada en la Sierra Norte de Puebla.....	132

Resumen

“Análisis de la susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la subcuenca del río San Marcos, Sierra Norte de Puebla, México”.

Los procesos de remoción en masa (PRM) son considerados procesos geomorfológicos que afectan grandes áreas en ocasiones, pobladas. Los PRM resultan de la combinación de diversos factores tanto naturales como antrópicos y pueden generar además daños a la infraestructura, pérdidas humanas. La identificación y zonificación forman las primeras y más importantes labores en el contexto de prevención y mitigación de estos fenómenos.

En este trabajo se presenta un mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa para la subcuenca del río San Marcos, Sierra Norte de Puebla, México. Para su elaboración, se analizaron y se combinaron los factores condicionantes y desencadenantes por medio del método heurístico de Mora y Vahrson (1994), en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Los factores físicos tenidos en cuenta fueron: pendiente, hipsometría, litología, precipitación anual y mensual. Paralelamente se determinó la morfometría de la subcuenca San Marcos a partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE). El análisis de la morfometría fue conducido con la finalidad de caracterizar la geomorfología de la subcuenca de manera cuantitativa y determinar la relación que guarda con los deslizamientos de ladera.

Los resultados mostraron que las zonas más susceptibles a los movimientos de terreno, clasificadas como de susceptibilidad media, alta y muy alta, se localizan en el centro-noroeste de la subcuenca y abarcan un 30% de la superficie, y en ellas se asientan localidades tales como: Pahuatlán del Valle, Tlacuilotepec, San Pablito, Tlalacruz de Libres Xilepa y Xolotla, por mencionar algunos. Los rangos de susceptibilidad baja y muy baja ocupan el resto de la superficie, con el 70%.

La validación cualitativa del mapa de susceptibilidad mostró una superficie acumulativa de 1 km^2 afectada por PRM, de los cuales el 91 % de estos procesos se identificaron en las zonas clasificadas como de muy alta, alta y media susceptibilidad; esto podría indicar que el mapa de susceptibilidad tiene un grado de certeza bastante aceptable, por lo que puede ser usado como base para el estudio puntual y más detallado de la zona, por su propensión a sufrir futuros deslizamientos de ladera. Los datos y mapas obtenidos y analizados en este trabajo corroboran la utilidad del uso de la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica para delimitar zonas más susceptibles a desarrollar PRM.

Palabras clave: Susceptibilidad, Procesos de Remoción en Masa, Morfometría, Subcuenca San Marcos, Sierra Norte de Puebla.

Abstract

Landslides or Mass-wasting processes are considered geomorphological processes that affect large areas, in some cases highly populated. Landslides are the result of the combination of various factors, both natural and anthropogenic, they can cause damage to infrastructure as well as human losses. Identifying and zoning are the first and most important tasks in the context of prevention and mitigation of these phenomena.

In this work a landslide susceptibility map is presented for the sub-basin of San Marcos, Sierra Norte de Puebla, México, an area well known for its landslide problems. For its elaboration, the conditioning and triggering factors were analyzed and combined using the Vahrson & Mora's heuristic method (1994), using a Geographic Information System (GIS). The physical factors taken into account were: degree of slope, hypsometry, lithology, annual and monthly precipitation. Alongside the morphometry of the San Marcos sub-basin was determined from a Digital Elevation Model (DEM). A morphometry analysis was conducted in order to characterize the geomorphology of the watershed and quantitatively determine the relationship with the landslides.

The results showed that the most susceptible zones for landslides, classified as medium, high, and very high susceptibility are located in the center-northwest of the basin, covering 30% of the area, where some communities are settled such as Pahuatlán del Valle, Tlacuilotepec, San Pablito, Tlalacruz de Libres, Xilepa y Xolotla, amongst others. The low, and very low susceptibility ranges occupy the rest of the surface, with 70%. The qualitative validation of the susceptibility map showed a cumulative area of 1.06 km^2 affected by landslides, of which 91% of these processes were identified in areas classified as very high, high and medium susceptibility; this could indicate that the susceptibility map has a very acceptable degree of certainty, so it can be used as a basis for a punctual and more detailed study of the area and their local zonation and susceptibility to future landslides. The data and maps generated and analyzed in this study corroborate the usefulness of remote sensing and GIS to delimitate areas susceptible to landslides. Remote sensing studies using several layers of information could be very useful to assess remote areas prior to field campaigns and punctual studies, saving time and economic resources.

Keywords: susceptibility, mass wasting processes, landslides, morphometry, San Marcos basin, Sierra Norte de Puebla.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. Introducción

Los procesos de remoción en masa (PRM) se definen como un movimiento descendente de suelo, rocas y materiales orgánicos, que acontecen cuando una ladera se vuelve inestable a consecuencia de cambios en el relieve originados por la combinación de varios factores, tanto naturales como antropogénicos (Alcántara, 2000; CENAPRED, 2001; 2002; Highland y Bobrowsky, 2008 y Borja 2012). Estos fenómenos constituyen uno de los procesos geológicos que más han afectado la superficie terrestre, causando pérdidas humanas, daños en los bienes materiales y obras civiles (Schuster, 1996; Sidle & Ochiai, 2006). Las pérdidas socioeconómicas evaluadas son millonarias e incrementan debido a los desarrollos humanos que se extienden sobre laderas inestables bajo la presión del rápido crecimiento de la población (Schuster, 1996).

La República Mexicana por su ubicación geográfica, los diversos climas, las características orográficas e hidrológicas, actividad volcánica y sísmica, es un país expuesto a diversidad de fenómenos naturales de carácter catastrófico. Por ejemplo: movimientos de ladera en las partes más altas y montañosas e inundaciones en las zonas de planicies. Por otro lado, el crecimiento urbano en los sitios inadecuados por la falta de una buena planeación territorial y el cambio de uso de suelo aumentan la presencia de peligros por procesos de remoción en masa.

En varios estados de México, durante la temporada de lluvia muchas regiones que presentan relieves montañosos son afectados por distintos tipos de PRM, desde deslizamientos rotacionales a flujos de escombros (Capra, et al., 2006). Uno de esos incidentes es el registrado a finales de 1999 en la Sierra Norte de Puebla, como consecuencia de las lluvias torrenciales originadas por la depresión tropical número 11 y el frente frío número 5 (Lugo Hubp, et al., 2001), lo cual desencadenó procesos de remoción en masa excepcionales en una superficie de más de 4,000 km^2 en la zona montañosa del Puebla, este suceso fue declarado como desastre

por las víctimas y daños económicos causados (Bitrán. B, 2001; Lugo-Hubp, et al., 2005).

A raíz del fenómeno ocurrido en la región sur de la Sierra Norte de Puebla, se realizaron una serie de estudios de carácter geológico y geotécnico (Flores Lorenzo y Alcántara Ayala 2002; Lugo Hubp et al., 2005; Cuanalo et al., 2006; Lucia Capra et al., 2006; Hernández Madrigal, 2007). Sin embargo, la zona norte de la región ha sido poco estudiada y guarda condiciones geológicas, topográficas y climatológicas muy similares, siendo propensa también a este tipo de procesos de inestabilidad de ladera. Por lo tanto, el sitio de interés para este estudio es una porción de la Sierra Norte de Puebla, la cual está delimitada por la subcuenca San Marcos (figura 3.1), la cual se caracteriza por presentar relieve montañoso, abrupto y topografía accidentada con pendientes pronunciadas, así como condiciones climáticas caracterizadas por abundantes lluvias. La geología local es diversa, con fallas, fracturas y plegamientos de basamento Cretácico y Jurásico, cubiertas por unidades volcánicas del Cuaternario. Estas condiciones, asociada a los cambios de uso de suelo provocados por las actividades humanas, reflejan mayor susceptibilidad a movimientos de masa.

La subcuenca San Marcos ha sufrido deslizamientos previamente, tanto de escala menor (flujos de detritos) y en menor cantidad, deslizamientos de rocas, tierra y suelo de tipo rotacional. Por ejemplo: en el año 2007 el municipio de Pahuatlán fue afectado por deslizamientos, mismos que generaron daños en viviendas (Castillo Román et al., 2008); otros casos ocurrieron en Julio de 2010 en los municipios de Huauchinango, Xicotepec, Honey, Pahuatlán y San Pablito, los cuales se vieron afectados por derrumbes causados por lluvias intensas (Garrido Carmona, 2010). Se entiende que los procesos gravitacionales ocurren por la intervención conjunta de una serie de factores; se han identificado dos tipos importantes de ellos, los primeros, son aquellos intrínsecos a la naturaleza, estructura y forma de la ladera, mientras que los segundos son los que actúan fuera del medio que se estudia, que al intervenir modifican las condiciones preexistentes de las laderas y provocan su inestabilidad (Sharpe, 1938; Varnes, 1984; Ferrer, 1994).

Con el fin de minimizar los problemas descritos previamente, surge la necesidad de realizar un análisis acerca de estos procesos naturales. Suárez et al. (2009) consideran que la identificación y zonificación forman las primeras y más importantes labores en el contexto de prevención y mitigación de estos fenómenos. Actualmente, existen diversos métodos que permiten definir y zonificar la potencialidad de la amenaza, para el caso de este estudio se ha utilizado el modelo heurístico de Mora y Vahrson (1994), modificado por Mora et al., (2002). Este modelo permite relacionar diversos factores responsables a los movimientos de terreno y pueden ser trabajados en un sistema de información geográfico (SIG) para obtener un mapa de susceptibilidad a deslizamientos.

Otra de las razones que determinaron la realización de este estudio, se fundamenta en que no existen muchos trabajos acerca de los procesos de remoción en masa en la zona de estudio (zona norte de la SNP), en donde consideren factores condicionantes y desencadenes, mucho menos estudios con un enfoque de cuenca y en particular que incluyan índices morfométricos. Cabe destacar que un estudio a este nivel, permite analizar a detalle las condiciones geomorfológicas del terreno.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Determinar las zonas susceptibles por procesos de remoción en masa de la subcuenca del río San Marcos, mediante la interpretación y análisis de la influencia de diversos factores geomorfológicos y físicos del terreno (litología, pendientes, hipsometría, precipitación anual y mensual) causantes de la inestabilidad, utilizando sensores remotos y sistemas de información geográfica.

1.2.2. Objetivos particulares

Analizar la morfometría de la subcuenca San Marcos para caracterizar a detalle la geomorfología propia de la región y determinar la relación que guardan con los movimientos de masa.

Elaborar un mapa que exprese los niveles de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la subcuenca, mediante el modelo heurístico de Mora-Vahrson (1994) implementados en un SIG.

Identificar y cartografiar los deslizamientos antiguos y con estos establecer el nivel de susceptibilidad de las zonas.

Elaborar cartografías de los movimientos de masa previos para validar el mapa de susceptibilidad obtenido mediante la combinación de los factores condicionantes y desencadenantes.

1.3. Antecedentes

Los procesos de remoción en masa son considerados como el tercer riesgo natural por número de víctimas, después de los terremotos y las inundaciones (Copons Llorens y Tallada Masquef, 2009). Las consecuencias de este tipo de desastre son catastróficas por las pérdidas de vidas humanas, daños a la infraestructura, áreas agrícolas y a los diversos ecosistemas (Alcántara-Ayala, 2003). Una gran cantidad de pérdidas por deslizamientos son evitables si el problema se identifica con anterioridad y se toman medidas adecuadas (Oporto Gallardo, 2006; Brabb y Harrod, 1989).

A continuación se presentan los antecedentes de los movimientos de terreno más distinguidos en el mundo y en México.

Los movimientos de terreno tienen una extensa distribución en todo el planeta. Una revisión exhaustiva de los sucesos más relevantes en tiempos históricos es la presentada por Brabb (1991), de la cual se desprende un extracto y selección de algunos de los más importantes.

Tabla 1.1. Los eventos más relevantes en el mundo de los años (1935-1985)

País	Fecha	Consecuencias
Ecuador	3- Diciembre-1935	Deslizamiento que causó la muerte de 27 personas en la colonia Verde Cocha.
Italia	9-Octubre -1963	Cerca de 3000 personas murieron a causas de un deslizamiento.

Austria	20-Noviembre-1964	Un deslizamiento gigante enterró casas en el pueblo de Tyrolean.
Costa Rica	1967	Flujo de detritos de volcán Irazú, mató 20 personas, destruyó 300 casas y un daño estimado de \$3.5 millones.
Brasil	1966 y 1967	Tormentas generó grandes movimientos de terreno y como consecuencia 2700 personas perdieron la vida.
Portugal	1967 y 1968	Un deslizamiento causó perjuicios en Lisbon y se requirió \$ 1 millón para reparar los daños.
Turquía	29 -Marzo de 1980	64 personas murieron por deslizamientos generados por 2 días de lluvias intensas en el pueblo de Ayvazhaci en el centro de Turquía.
Colombia	13-Noviembre-1985	Lahares de Nevada del Ruiz generó muerte de 22,000 personas y un daño de \$212 millones en bienes materiales.

En los últimos años se han incrementado la presencia de los procesos de remoción a nivel mundial, la Base de Datos Internacional de Desastres (EM-DAT), reportó 224 eventos de movimientos en masa en todo el mundo. La mayoría de los mismos ocurrieron en el año 2009, ocupando el cuarto lugar de importancia. Otros casos es la registrada por la Carta Internacional “El Espacio y los Grandes Desastres”, señala que en el período 2000-2010 se registraron 292 activaciones de grandes movimientos de terreno; ocupando de ésta manera el séptimo puesto en el ranking de los tipos de peligros que provocaron desastres en el mundo. La información más reciente es dada por la página del terremoto-report.com, el cual, reportó deslizamientos más importantes en el año 2013, tabla (1.2).

Tabla 1.2. Deslizamientos más recientes en el mundo, reportado en la página de www.terremotoreport.com (2013). Visitado el 25-mayo-2015.

Ubicación	Fecha	Consecuencias
Filipinas	13-diciembre-2013	Un deslizamiento de tierra en la provincia Aurora, causó muerte de 4 personas y varias fueron evacuadas de sus hogares.

Distrito Kebumen de Java Central, Indonesia	21-diciembre-2013	Deslizamientos originados por lluvias torrenciales, 4 personas heridas, 4 perdieron la vida y 8 personas perdieron sus casas.
Bolivia	25-septiembre-2013	16 personas murieron y una docena desaparecieron después de un deslizamiento provocado por lluvias intensas al noreste de Bolivia.
India	3-septiembre-2013	Deslizamientos causados por lluvias en Sikkin, India, causó la muerte de 5 personas.
Honduras	29-agosto-2013	Seis niños murieron por un deslizamiento de tierra después de las fuertes lluvias en el norte de Honduras.
Colombia	19-julio-2013	Deslizamiento en Colombia cobró la vida de seis personas, hirió a 1026 aproximadamente.

México es un país que enfrenta diversos tipos de fenómenos naturales de carácter desastroso, los procesos de remoción en masa son unos de peligros más frecuentes y causantes de daños en algunos poblados de la República Mexicana. Algunos sucesos más relevantes se presentan en la tabla siguiente, (Tabla 1.3).

Tabla 1.3. De acuerdo con el Centro de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2004) los sucesos más relevantes de los procesos de remoción en masa en México en (1935-2007) se presenta en la siguiente tabla:

Ubicación	Fecha	Características del fenómeno
Distrito Federal	Junio-1935	Una tromba originó varios deslizamientos y flujos de suelo y rocas en la localidad San Actopan, Delegación Milpa Alta. Se reportó 130 de personas muertas
Jalisco	Octubre-1955	Las lluvias intensas ocasionaron varios caídos y deslizamientos. Tales movimientos ocurrieron en una ladera muy empinada contigua al poblado y cubrieron varias casas, 100 personas resultaron muertas en la localidad de Atenquique.
Colima	Octubre- 1959	Ocurrencia de varios caídos, flujos de tierra y deslizamientos en las localidades de Minatitlán, Oaxaca y Zacoalpan. Los eventos fueron asociados a las lluvias intensas ocurridas del

		24 al 27 de Octubre por un huracán y un supuesto sismo ocurrido el 29 de ese mismo mes. Se reportó un saldo de 1,800 personas fallecidas.
Acapulco Guerrero	9-octubre- 1997	Las lluvias torrenciales originadas por el Huracán Pauline denotaron un gran número de caídos, deslizamientos y flujos de suelo, rocas que dañaron a las colonias de puerto de Acapulco. Hubo pérdidas millonarias y 120 de personas muertas.
Motozintla, Chiapas	1998 y 2005	Históricamente Motozintla ha sido afectada por lluvias intensas que además de generar inundaciones y desbordamientos del río, han ocasionado deslizamientos de suelos y rocas. Entre los eventos más importantes figuran los deslizamientos y flujos de suelos y rocas detonados por las lluvias intensas de 1998 debidas al huracán Mitch y los ocasionados por el huracán Stan en 2005 los daños materiales fueron más de 800 viviendas destruidas y 14 mil damnificados. En ambos casos las pérdidas humanas sumaron poco más de 180.
Sierra Norte de Puebla	26 Septiembre-7 octubre de 1999	Las lluvias intensas, producto de la Depresión Tropical 11, detonaron cientos de deslizamientos, caídos y flujos de suelos y rocas de esa región que abarca los estados de Puebla, Hidalgo y Veracruz. Se presentaron daños materiales por más de 240.6 millones de dólares. Hubo 263 personas fallecidas en el trágico deslizamiento de Teziutlán.
Sierra Norte de Puebla.	4 Julio-2007	Un deslizamiento de rocas y suelos impactó y sepultó a un autobús de pasajeros. El deslizamiento ocurrió en una ladera ubicada a un costado de la carretera Tlacotepec-Tehuacán, en el municipio de San Miguel Eloxochitlán, Puebla, en la Sierra Negra. Ocasionó la muerte de 32 personas.
Juan de Grijalva, municipio de Ostuacán, Chiapas	4-Noviembre- 2007	Este deslizamiento fue de dimensiones extraordinarias (poco más de 55 millones de metros cúbicos, casi 7 mil veces más grande que el de Teziutlán) y es considerado como uno de los más grandes ocurridos en el mundo. Obstruyó, de manera casi inmediata, el cauce del río Grijalva y originó una ola que arrasó varias viviendas, una iglesia. Causó la pérdida de 19 vidas y 6 desaparecidos de la localidad de Juan de Grijalva.

Los estudios de procesos de remoción en masa pueden ser abordados bajo distintas perspectivas y existen varias publicaciones acerca de esta temática, algunos estudios están relacionadas con las condiciones geotécnicas de la zona, otros a los factores físicos y geomorfológicos asociados a los movimientos de laderas y también existen estudios que involucran el grado de amenaza, vulnerabilidad de la comunidad y los niveles del riesgo que impone este tipo de fenómeno. A continuación, se describen algunos de los trabajos de investigación más importantes en el tema.

Alcántara, (2000) hace una revisión respecto el uso de los términos relacionados con los procesos de remoción de masas en México.

Lugo-Hubp et al. (2001), realizan un estudio sobre los procesos de remoción en masa en las montañas de Puebla, a raíz del evento meteorológico extraordinario de 1999.

Capra et al. (2003), para el caso de Zapotitlán de Méndez, Puebla, propone que conociendo la relación entre la geometría de los pliegues de las rocas deformadas y la forma de la ladera, se pueden determinar las zonas más susceptibles al movimiento y proponer la reubicación de algunas de las viviendas que pueden ser afectadas en el caso de lluvias excepcionales como las ocurridas en octubre del 1999.

Lugo Hubp, et al. (2005), clasifican el relieve afectado por las precipitaciones torrenciales de 1999 en la Sierra Norte de Puebla, con el objetivo de determinar los tipos de procesos gravitacionales, sus causas y efectos.

Caballero et al. (2006), analizan los efectos de un evento meteorológico extraordinario ocurrido en Septiembre de 1998 en Motozintla, Chiapas y caracterizan los procesos de remoción detallando la descripción de los principales depósitos de flujo que afectaron la zona.

Capra et al. (2006), definen la importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción de la Sierra Norte explicando con el caso del deslizamiento ocurrido en Totomoxtla.

García-Palomo, et al. (2006), presentan un inventario de 206 sitios por peligro a deslizamiento en la Sierra de Guadalupe identificando los principales mecanismos de falla.

Hernández M. et al. (2007). Detallan el estudio geológico, para comprender los procesos de remoción en masa en la región de Zacapoaxtla, Puebla. Dichos autores identifican tres componentes determinantes en los procesos gravitacionales: La geometría de la deformación de las unidades de la Sierra Madre Oriental, las propiedades mecánicas en los suelos arcillosos y limosos de cuerpos intrusivos intemperizados, paleosuelos y suelo residuales; y las condiciones hidráulicas, mecánicas y geométricas en los depósitos de la ignimbrita Xáltipan no soldada.

Salazar Mondragón, et al. (2007). Estimaron la amenaza de deslizamientos de la zona cercana a la ciudad de Orosi, Costa Rica. Emplearon la metodología propuesta por Mora- Vahrson. Los indicadores morfodinámicos analizados fueron la litología, humedad, topografía, sismicidad y precipitación para determinar los sitios más propensos a deslizarse. Como resultado obtuvieron un mapa de susceptibilidad con diferentes niveles de amenaza a PRM.

Cartaya et al. (2008), Realizan un estudio de zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en el estado de Vargas, Venezuela. Consideran que los movimientos de terrenos se presentan por la combinación de la geología de la zona, la pendiente del terreno y el cambio de uso del suelo.

Arvizu (2009), analizó el origen del deslizamiento ocurrido en Noviembre de 2007 en Juan de Grijalva Chiapas. Concluye en dos principales causantes del movimiento de terreno: el carácter geológico-geotécnico, que tiene que ver con aspectos litológicos, estructurales y propiedades geomecánicas de la roca y las precipitaciones intensas.

Barrantes Catillo et al. (2011). Aplican el método Heurístico de Mora y Vahrson para determinar los sitios más susceptibles a procesos de remoción en masa en Costa Rica. Para tal caso, analizan los indicadores morfodinámicos, tales como: el

relieve, la litología, la humedad del suelo, la sismicidad y la lluvia. Con esta técnica ellos encontraron una relación aceptable entre los deslizamientos previos y los sitios que podrían ser afectados por movimientos de terreno en caso de sismos y lluvias intensas.

Segura et al. (2011). Presentan un trabajo de zonificación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa en las localidades de Siquirres y Turrialba, Costa Rica. Para realizar la zonificación de amenaza por deslizamientos dividen en tres fases el análisis. A partir de las fotografías aéreas obtienen el mapa de inventario de deslizamientos, aplican el modelo de Mora y Vahrson para combinar los factores condicionantes y desencadenase de PRM, finalmente realizan una evaluación de la metodología utilizada, el cual consiste en la determinación del grado de coincidencia entre las áreas de deslizamientos y áreas para cada clase de susceptibilidad. La metodología aplicada permitió determinar, de forma confiable, las áreas con diferente potencial para el desarrollo de procesos de remoción en masa.

Como respuesta a la peculiaridad de los procesos de remoción en masa, se han desarrollado una serie de trabajos bajo distintos enfoques, algunos de ellos apoyados con estudios de campo (geotécnicos, geológicos) y otros en gabinete (datos espaciales). Sin embargo, dentro del contexto de minimizar el impacto de estos fenómenos geológicos, todos los estudios están enfocados en una misma dirección, en incrementar el conocimiento de los procesos de remoción en masa en forma general (dinámica, características, causas que lo generar, consecuencias, etc.), y aportar medidas de mitigación para evitar afectaciones en la población. El presente trabajo tiene un valor importante dentro de los estudios de los procesos de remoción en masa ya que al igual que lo otros trabajos su principal objetivo radica en prevenir los efectos negativos de estos procesos, en consecuencia, presenta un mapa de susceptibilidad y cartografías previos de deslizamientos obtenidos de manera remota, el cual, representa una práctica herramienta para identificar las zonas de mayor susceptibilidad. Cabe señalar que este trabajo resulta ser ventajoso para algunas instituciones, como Protección

Civil, ya que puede ser usado como una guía preventiva, orientación para una buena planificación urbana y en la evaluación regional de peligros por deslizamientos.

CAPÍTULO II: PRINCIPIOS DE MORFOMETRÍA DE CUENCAS Y PROCESOS DE REMOCIÓN DE MASA

La revisión de la literatura forma parte muy importante en el proceso de este trabajo, permite conocer y entender el origen y las posibles consecuencias de los movimientos de terreno en nuestro entorno. Así también ofrece ideas de cómo enfrentar y mitigar la problemática. Esta sección se compone de conceptos y definiciones que se utilizan en el contexto de los procesos de remoción en masa. Se inicia describiendo las características de una cuenca, debido a que nuestro trabajo se desarrolla bajo este enfoque. Posteriormente se describen los elementos que conforman una ladera, los tipos de movimientos de terreno, los modelos existentes para determinar la susceptibilidad a movimientos de ladera y los factores que influyen en dicho fenómeno. Una de las razones para trabajar a nivel cuenca es que existen pocos trabajos de análisis de los factores condicionantes y desencadenes de los fenómenos de remoción en masa con este enfoque, la otra razón es que los índices morfométricos, en particular las unidades de la red hídrica dan mucha información acerca de las condiciones del terreno. Se puede decir, que un estudio a este nivel permite conocer a mayor detalle las condiciones físicas y morfológicas de la zona de estudio y así mismo la interacción que existe entre ellos.

2.1. Generalidades de una Cuenca

Una cuenca hidrográfica representa áreas de escurrimiento e infiltración, en la cual el agua precipitada se transporta a las partes bajas de la cuenca formando un solo punto conocido como el cauce principal del agua, concentrándose generalmente a otras cuencas próximas, lagos o finalmente al océano. (TRAGSA, 1994; Umaña Gómez, 2002; Breña y Jacobo, 2006). Una cuenca puede definirse también como un medio natural dinámico, en donde se producen relaciones, interacciones e interrelaciones entre variables biofísicas, socioeconómicos y políticos (Umaña

Gómez, 2002). Así mismo puede subdividirse en subcuencas, microcuencas y unidades de escurrimiento, las cuales constituyen parte del mismo sistema hidrológico de la cuenca (De la Luz D' Elia, 2011).

2.1.1. Morfometría de la cuenca

Se designa el nombre de morfometría, a la medida de la forma, o geometría de cualquier cuerpo natural (Strahler, 1974). De acuerdo a Méndez y Marcucci (2005), el análisis morfométrico de una cuenca hidrográfica sirve para comprender e interpretar su comportamiento morfodinámico e hidrológico. Así también permite examinar y comprender los elementos geométricos básicos del sistema, que ante la presencia de eventos extraordinarios (por ejemplo lluvias torrenciales), interactúan para originar y/o activar eventos geomorfológicos (movimientos de terreno), de vertientes y aludes (Méndez y Marcucci 2005). En la misma dirección Gardiner (1974), Gardiner y Dackombe (1983) consideran que los análisis morfométricos son muy útiles en los estudios geomorfológicos regionales para generar información de una zona, antes de la realización de un trabajo de campo. Fuentes Junco (2004), expone que el análisis morfométrico de una cuenca es de gran importancia, debido que ayuda en el manejo y planeación de los recursos naturales, además permite conocer múltiples componentes como: el tamaño de cuenca, red de drenaje, los gradientes o pendientes de la superficie y de los cauces fluviales, etc.

2.2. Aspectos generales de una ladera

Una ladera se compone de una masa de suelo, en donde la superficie no es una planicie y presenta una topografía con alturas significativas. Se describe como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural (Suárez, 1998).

Las laderas que han estado estables por mucho tiempo, pueden perder el equilibrio y fallar repentinamente debido a los procesos de evolución natural que ocurren en el relieve; como cambios en la topografía del terreno, la presencia de la actividad sísmica, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo,

meteorización o factores de tipo antrópico que alteren su estado natural de estabilidad (Suárez, 1998).

De acuerdo a Suárez (1998), una ladera que no ha sido alterada, puede presentar los siguientes elementos:

Tabla 2.1. Elementos de una ladera que no ha sido alterada (Suárez, 1998).

Elemento	Descripción
Altura	Es la distancia entre un punto mínimo (pie) y el punto máximo (cabeza) de la ladera. Esta característica no es fácil de determinar en las laderas naturales, debido a que el pie y la cabeza no necesariamente serán perceptibles.
Pie	Corresponde a la zona más baja de la ladera, donde se aprecia un cambio brusco de pendiente.
Cabeza o escarpe	Pertenece la zona más alta de la ladera, donde se aprecia un cambio brusco de pendiente
Altura de nivel freático	Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
Pendiente:	Es la medida del desnivel existente en una ladera, o la relación que existe entre la distancia vertical (y) y la distancia en horizontal (x) de una ladera. Se miden en grados y en porcentaje.

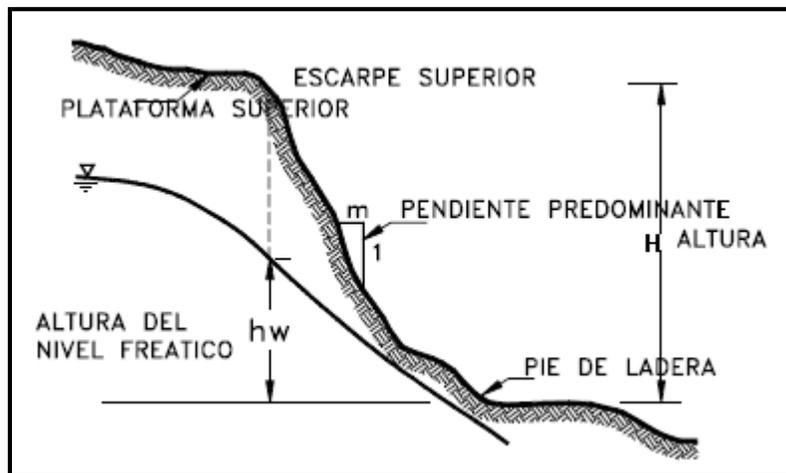


Figura 2.1. Nomenclatura de una ladera, tomado de Suárez (1998).

Una ladera cambia su estructura de formación cuando es afectada por procesos de remoción en masa, de acuerdo a los rasgos que reporta el terreno después del movimiento se define el tipo de proceso al que fue sometida.

Una ladera que ya ha sido alterada, puede describirse con los siguientes elementos (Suárez, 1998):

Tabla 2.2. Elementos de una ladera que ya ha sufrido un cambio

Elemento	Descripción
Escarpe principal	Pertenece a un área con pendiente muy pronunciada, situada en el límite de la superficie en movimiento, causado por el desplazamiento del material de la ladera.
Escarpe secundario	Área inclinada causada por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.
Cabeza	Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
Cima	El sitio más alto del contacto entre el material desplazado y el escarpe principal.
Corona	Área de la ladera que no ha sufrido alteración, y se encuentra en la parte superior del escarpe principal. Puede presentar grietas, llamadas grietas de la corona.
Superficie de falla	Superficie que se localiza debajo del movimiento que define el cuerpo de material desplazado.
Pie de la superficie de falla	La intersección entre la parte inferior de la superficie de ruptura y la superficie original del terreno.
Base	Área que se localiza en la parte inferior del pie de superficie de falla, está cubierto por el material deslizado.
Pie	Parte del material desplazado que yace pendiente abajo.
Punta o uña	Es el punto límite de la base, se localiza a una distancia considerable de la cima del deslizamiento.
Costado o flanco	Perfil adyacente del movimiento.

Superficie original del terreno	La superficie que estaba antes de que se manifestará el movimiento de terreno.
Derecha e izquierda	Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda debe referirse al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie.

Suárez (1998) y el USGS (2008) presentan una nomenclatura para detallar las partes de una ladera que ya ha sufrido un cambio:

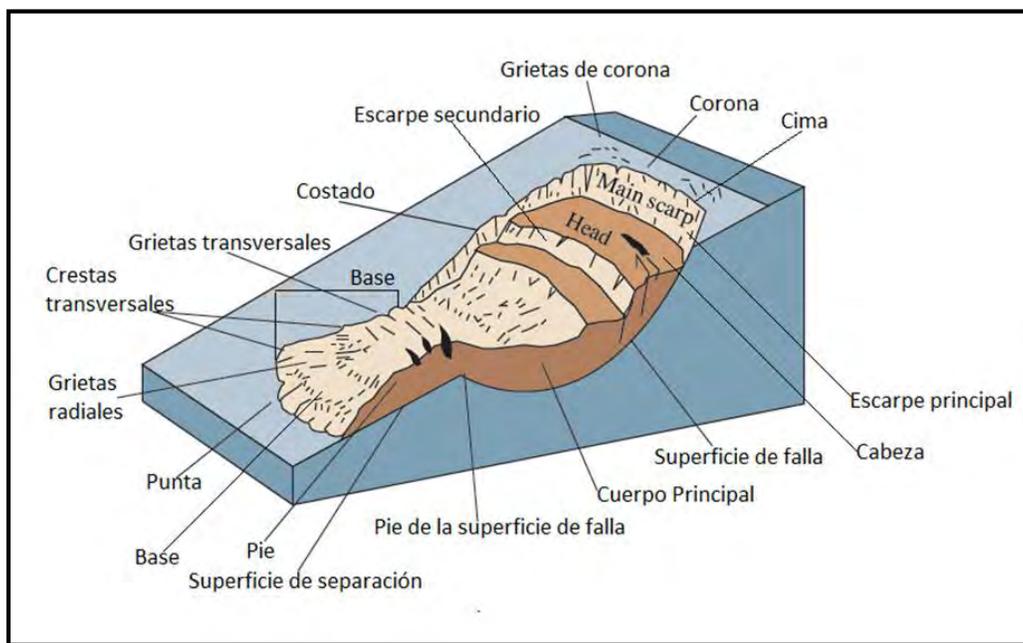


Figura 2.2. Partes de un deslizamiento (modificado de USGS, 2008; Suárez, 1998).

2.3. Generalidades de los procesos de remoción en masa (PRM)

Son muchos los términos que se manejan para hacer referencia a la inestabilidad de laderas. Tales como procesos de remoción en masa, movimientos de ladera, procesos gravitacionales, movimiento del terreno, movimientos de masas, proceso de la ladera, o en un sentido general, se conocen también como deslizamientos de tierra. Estos términos son empleados para indicar que una ladera es inestable (Alcántara-Ayala, 2000).

Los procesos de remoción en masa se definen como un movimiento descendente de suelo, rocas y materiales orgánicos, que acontecen cuando una ladera se vuelve inestable a consecuencia de cambios en el relieve originados por la combinación de varios factores, tanto naturales como antropogénicos (Alcántara, 2000; CENAPRED ,2001; 2002; USGS ,2008 y Borja 2012). Otra definición es dada por Hernández (2008) quien define los procesos de remoción en masa como *“un conjunto de movimientos de materiales producto de los procesos naturales o antrópicos, que actúan en la superficie del relieve y desencadenan condiciones de inestabilidad en la misma”*.

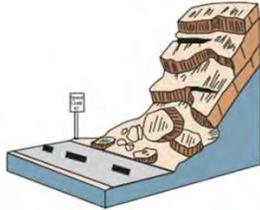
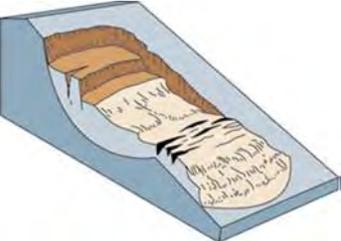
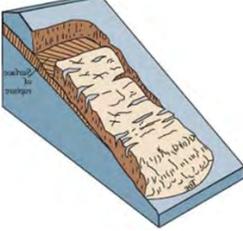
Una definición simple y ampliamente aceptada es aquella dada por Cruden (1991), quien define el término como el movimiento de una masa de roca, escombros o tierra a lo largo de una ladera.

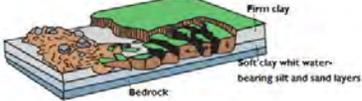
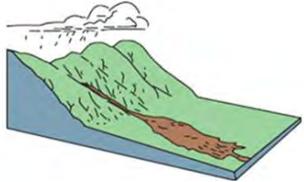
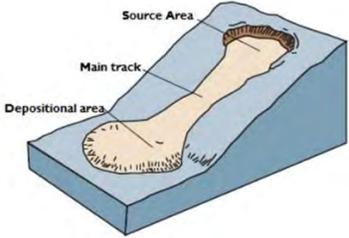
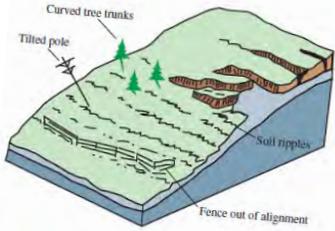
2.3.1. Tipos de procesos de remoción en masa

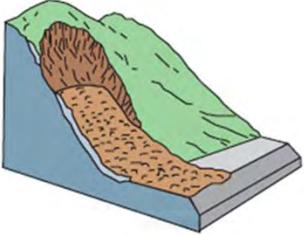
Existen diferentes tipos de movimientos de terreno y se pueden diferenciar de acuerdo a su velocidad, geometría, material geológico involucrado, contenido de agua, mecanismo de movimiento etc. (Paz, 2012). Según Alcántara (2000), la clasificación de los procesos de remoción en masa más conocida y aplicada a nivel internacional se basa en el mecanismo de movimiento y tipos de material involucrados propuesta por Varnes (1978) y Hutchinson (1988) y actualizada por el programa EPOCH (1993).

La clasificación y la terminología usada para este estudio se basan en los trabajos publicados de Alcántara Ayala (2000) y USGS (2008), a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988). Se emplean como criterio principal para la clasificación, el tipo de movimiento y material involucrado.

Tabla 2.3. Clasificación de los procesos de remoción en masa de acuerdo Alcántara Ayala (2000) y USGS (2008), a partir de la clasificación de Varnes (1978) y Hutchinson (1988).

Tipos de movimiento	Definición	Imagen
Caídas o desprendimientos	Los desprendimientos o caídas son movimientos en caída libre y muy rápida. Los materiales involucrados son el suelo, roca y detritos. Este tipo de movimiento ocurre en una superficie con pendiente fuertemente inclinada, en cual el material desprendido puede rebotar y rodar.	 <p data-bbox="1073 579 1398 611">Caídas o desprendimientos</p>
Vuelcos o desplomes	Vuelcos o desplomes son movimientos hacia adelante o hacia la parte externa de la ladera. Se componen de masas de roca, derrubio, detritos y de suelos. Se observan en los materiales que poseen fisura y grietas de corta extensión o en superficies columnares.	 <p data-bbox="1105 957 1360 989">Vuelcos o desplomes</p>
Deslizamiento rotacional	Cuando la superficie de rotura resulta cóncava, es decir, hacia arriba en forma de cuchara se dice que está asociado a un deslizamiento rotacional. Este tipo de deslizamiento se presenta con mayor frecuencia en materiales homogéneos (arcilla, limo, etc.).	 <p data-bbox="1089 1356 1382 1388">Deslizamiento rotacional</p>
Deslizamiento traslacional	Es un movimiento hacia afuera y hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana con poco movimiento de rotación o inclinación hacia atrás. Se presenta en masas de suelos sueltos y rocas fragmentadas.	 <p data-bbox="1081 1713 1390 1745">Deslizamiento traslacional</p>
Expansión lateral	Las extensiones laterales generalmente ocurren en pendientes bajas o en superficies llanas, en	

	<p>ambientes lacustres y marinos de poca profundidad, son resultados de la fracturación y expansión de suelos o masas de rocas compactos, debido a la licuefacción o fluidización del material subyacente, acontecen cuando los materiales gruesos, como fragmentos de rocas, grava, etc., están inmersos en una matriz de material más fino o contienen arcillas.</p>	 <p>Expansión lateral</p>
<p>Flujos de detritos</p>	<p>Es una forma de movimiento de masas rápido, en el que el suelo suelto, roca, materia orgánica y aire, se combinan con agua y forman una mezcla que fluye ladera abajo. El flujo de detritos incluye un 50% de material de tamaño de limo y arena.</p>	 <p>Flujo de detritos</p>
<p>Flujos de tierra</p>	<p>Flujos de tierra se producen en pendientes suaves a moderadas, el material que forma la pendiente licua y se extiende hacia fuera, formando depresión en la cabeza. Ocurre en materiales de grano fino o arcilla pero también en lecho rocoso de barro fértil muy degradado. El flujo tiene una característica alargada, se mueve como una corriente plástica o viscosa con fuertes deformaciones internas.</p>	 <p>Flujo de tierra</p>
<p>Flujo de tierra lenta</p>	<p>Es un movimiento pendiente abajo, muy lento y constante del suelo o roca que forma la pendiente. El movimiento es causado por tensión cortante interna que es suficiente para causar la deformación, pero insuficiente para provocar una falla.</p>	 <p>Flujo de tierra lenta</p>

Avalancha de detritos	Las avalanchas de detritos son corrientes grandes, muy rápidas, a menudo de pendiente abierta, que se forman cuando se derrumba un talud inestable y los detritos fragmentados resultantes se transportan lejos de la pendiente (USGS, 2008).	 <p data-bbox="1052 459 1312 487">Avalancha de detritos</p>
-----------------------	---	--

2.4. Descripción de los factores condicionantes y desencadenantes de los procesos de remoción en masa

Los procesos de remoción en masa han sido tratados por varios autores, por mencionar algunos: Mora y Vahrson (1994); Carrara et al. (1995); Martínez y Balaguer (1998); Guzzetti (1999, 2006); Irigaray et al. (2000); Alcántara-Ayala (2000); van Westen (2000); Mora et al. (2002); Lugo Hubp et al. (2005); Moreira (2005); Jiménez Perálvarez (2005); Roa (2007); Hernández Madrigal et al. (2007); Hernández (2008); Suárez et al. (2009); Aristizábal et al. (2010); Villacorta et al. (2012); Cardozo (2013); Reyes Chávez y Fernández Arce, (2014), quienes consideran que la inestabilidad del terreno ocurre a causa de la intervención de forma conjunta de diversos factores tales como la pendiente, litología, clima, hidrología, etc., dichos factores son capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre la ladera causando en ella la pérdida de la estabilidad.

De acuerdo a Martínez y Balaguer (1998) y Cuanalo et al. (2011), los factores que controlan la estabilidad del terreno se divide en dos tipos: internos (condicionantes) y externos (desencadenantes).

2.4.1 Factores Internos

Son los que dependen de la naturaleza, estructura y forma del terreno; estos factores están relacionados directamente con el origen y las propiedades de los suelos que componen la ladera (CENAPRED, 2006).

Morfología y Topografía: El constante cambio del relieve y la configuración morfológica juegan un papel muy importante dentro de la estabilidad de terreno. Un terreno con pendiente abrupta, con valle profundo, alturas considerables,

relieve escarpado, red de drenaje densa y una forma irregular del terreno, indica zonas con alto potencial de inestabilidad.

Geología y características de los suelos superficiales: La influencia del material geológico y las características de los suelos superficiales muchas veces son condicionantes para el desequilibrio de una ladera. Según el tipo de roca y el grado de alteración e intemperismo que presenten condicionará la estabilidad del terreno, además de la presencia de discontinuidades como grietas, fracturas, fallas, planos estratigráficos y diaclasas; por otra parte las características de subsuelo como porosidad, permeabilidad, propiedades físicas y mecánicas (resistencia/deformación), así como el estado de esfuerzos, son otros elementos que favorecen la aparición del fenómeno de inestabilidad.

Condiciones hidrogeológicas: El agua que se encuentra en el interior del terreno reduce la resistencia cortante al aumentar la presión intersticial, además incrementa el peso volumétrico del terreno con el consiguiente aumento en los esfuerzos actuantes.

Vegetación: Las raíces fijan los suelos superficiales a los estratos de roca más resistentes ubicados a mayor profundidad. Cuando las precipitaciones hacen presencia, las raíces y las hojas de las plantas funcionan como un buen captador de agua. Ellos evitan que las gotas de lluvia caigan directamente al suelo, así mismo reducen la velocidad del agua de escurrimiento, por lo tanto la vegetación evita el desgaste superficial debido a las precipitaciones y optimiza su resistencia evitando desprendimiento (CENAPRED, 2002). Se ha comprobado que los procesos de remoción en masa, son iniciados en áreas con escasa vegetación, suelos desnudos o deforestación (Martínez Gallego y Balaguer Carmona, 1998; García Rodríguez, 2008).

2.4.2. Factores externos

Los factores externos son los que modifican las condiciones preexistentes de estabilidad. Estos parámetros son ajenos a la ladera, producen un aumento de los esfuerzos cortantes actuantes y pueden originar un cambio en la estabilidad del material que compone la ladera. Estos factores se deben a las condiciones

meteorológicas tales como las lluvias torrenciales, los sismos fuertes y por el nivel de impacto o deterioro causado por las actividades antropogénicas (Cenapred, 2006; Cuanalo et al., 2011).

Precipitaciones: Es el agente que favorece con mayor peso a la ocurrencia de los procesos de remoción en masa, depende de la intensidad y su duración; las precipitaciones intensas llegan a saturar el suelo que a su vez provocan que éste se impregne de humedad y pierda su tenacidad. Por otra parte, por el impacto de las gotas de agua y la fuerza de la escorrentía superficial el suelo sufre una disgregación y alteración química, lo que da como resultado una disminución de resistencia y la presencia de los movimientos de terreno.

Sismo: Las vibraciones sísmicas originan oscilaciones en el interior de la superficie, estas vibraciones pueden acelerar y desencadenar diferentes tipos de movimientos de masa como caídos, deslizamientos, flujos y avalanchas.

Vulcanismo: Las actividades volcánicas llegan a originar deslizamientos, flujos de suelo o avalanchas de detritos de gran volumen y velocidad en las laderas de los conos volcánicos.

Congelación y deshielo: Estos procesos ocurren principalmente en regiones muy frías, producen expansiones, infiltraciones de agua en grietas y fisuras.

Erosión: Produce una desintegración y descomposición de las rocas o suelo, cambiando su tenacidad y permeabilidad. En este proceso también actúan los agentes químicos como la disolución, oxidación, hidratación y la hidrólisis que alteran las propiedades químicas de sus componentes, destruyen la conformación original, generar pérdida de cohesión, lo que conlleva una disminución en la resistencia.

Actividad antropogénica: La actividad humana es sin duda uno de los factores que incrementa en gran medida la inestabilidad del terreno. Los cambios en la ladera se dan por excavaciones, construcciones de casas, caminos, túneles, presas y sobrecargas. Asimismo, estas obras ingenieriles cambian totalmente las condiciones hidrogeológicas al alterar el drenaje superficial afectando el nivel

freático y el flujo natural de escurrimiento. Del mismo modo la ausencia de la cobertura vegetal, efecto causado por el hombre y es una de las actividades que más repercute negativamente en la estabilidad del terreno.

2.5. Factores condicionantes y desencadenantes analizados para la subcuenca del río San Marcos

La presencia de los movimientos de terreno está asociado a muchos factores, por mencionar algunos: las lluvias máximas, sismicidad, densidad de drenaje, geología, hidrología, clima, entre otros. Pero muchas veces no es posible incluir todos los parámetros en un análisis de susceptibilidad (Moreiras, 2005). El excluir algunos factores, no significa que tengan menos importancia en el estudio de los procesos de remoción en masa, más bien, la exclusión se debe a que en ciertas ocasiones, se presentan escenarios que impiden la obtención de ellos o bien no aportan suficiente información para incorporarlos en el modelo. Así, para el análisis de la susceptibilidad del área de estudio se tomaron en cuenta factores tales como: Litología, pendiente, vegetación y uso de suelo, hipsometría, precipitación anual y lluvias máximas. Estos parámetros fueron considerados como los factores más importantes para el análisis de la inestabilidad de las laderas de la subcuenca bajo estudio. La elección de los mismos estuvo en función de la consulta de la bibliografía sobre la temática que aquí se aborda y la disponibilidad de los datos. De estos factores, la litología y la pendiente han sido los más usados por diversos autores (Brabb et al., 1972; Lucini, 1973; Rodríguez Ortiz, 1978; Chacón, 1987; Irigaray, 1990; Fernández, 2001; El Hamdouni, 2001; Mora et al., 1992; Mora y Vahrson, 1994; Gómez et al., 2003; Mora, 2004; Ochoa-Tejada y François, 2007; García Rodríguez, 2008; Hernández Mena, 2008; Segura et al., 2011). Algunos autores han incluido nuevas variables, tales como densidad de drenaje, cobertura de suelo, índice de vegetación de diferencia normalizada (ndvi), actividad sísmica, precipitaciones, entre otras (Guzzetti et al., 1999; Castellanos y van Westen, 2001; Moreiras, 2005; Guzzetti et al., 2006; Lee y Evangelista, 2008).

2.6. Generalidades de los sistemas de información geográfica (S.I.G)

Los sistemas de información geográfica (SIG) surgieron de la necesidad de recopilar, manipular, analizar y actualizar los datos geográficos (CIAF, 2004). En los últimos 20 años los SIG se han convertido en una herramienta valiosa para emprender numerosas labores como: inventarios de la diversidad biológica, el control y la gestión de datos catastrales, gestión urbana y territorial y los trabajos que requieren modelar múltiples variables (Moreira Muñoz, 1996; Cartaya et al., 2006), ya que poseen la capacidad de almacenar y analizar grandes volúmenes de información geoespacial (Gómez et al., 2003; Cartaya et al., 2006). De acuerdo a Gómez y colaboradores (2003) un SIG se compone por 4 elementos básicos: Hardware, constituido por las computadoras y todos los periféricos auxiliares; Software, que son los programas que permiten el desarrollo y procesamiento de datos; Usuario, técnico que opera las computadoras, además desarrolla y alimenta el sistema; Datos, base numérica y cualitativa sobre la cual funcionan el sistema.

2.6.1. Definición de los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G)

Existen diversas definiciones acerca de los SIG, muchas de ellas puntualizan su componente de base de datos, otras sus funcionalidades, sin embargo todas concuerdan en que constituyen una herramienta ventajosa para el análisis integrado de la información espacial o geográfica, facilitando la toma de decisiones en distintas disciplinas para el desarrollo universal (Von Humboldt, 2006; Cuéllar Luna et al., 2009).

Moreira Muñoz (1996) describe los SIG como la obtención, almacenamiento y análisis de datos que permite generar información útil para la toma de decisiones; por otra parte, Von Humboldt (2006), proporciona una definición amplia acerca de los SIG, lo define como un conjunto de técnicas, herramientas y datos que actúan de manera ordenada y lógica para ingresar, almacenar, visualizar, validar, analizar, manipular, transformar, extraer, y obtener información geoespacial y descriptiva de los elementos referenciados sobre la tierra con el objetivo de satisfacer varios propósitos.

2.6.2. Los sistemas de información geográfica en los procesos de remoción en masa

Los SIG desempeñan un papel importante en el campo del estudio y análisis de los procesos de remoción en masa y representan una herramienta alternativa para el monitoreo de sitios bajo amenaza (Gómez et al., 2003), dado que permiten manejar grandes bases de datos y realizar cálculos para la estimación de la susceptibilidad.

Otras de las grandes aplicaciones de los SIG es en la elaboración de los mapas de susceptibilidad, peligrosidad y riesgo de manera sistemática, rápida y eficiente. Así mismo, en la prevención de riesgo tienen sus grandes aportaciones, tal como lo supone Corominas (1992), que considera que la mejor estrategia para reducir los daños de los movimientos de terreno es la prevención. En este sentido la primera fase en la prevención del peligro a deslizamiento es la identificación y caracterización de éste. Irigaray et al., (2000) expone que la caracterización del peligro usualmente se muestra de forma cartográfica mediante la zonificación del terreno y los mapas resultantes funcionan como una herramienta básica para la planificación del territorio.

Para nuestro caso de estudio los SIG sin lugar a dudas fueron de gran ayuda para desarrollar el trabajo, gracias a su alta velocidad de cálculo fue posible obtener diversos mapas morfológicos característicos de la subcuenca San Marcos a partir de un modelo digital de elevaciones. Con sus propias herramientas del sistemas permitió aplicar la técnica de superposición de mapas de los factores condicionantes y desencadenantes (combinación cualitativa de los mapas), obteniendo así de manera rápida la cartografía de susceptibilidad por procesos de remoción en masa y por capacidad de manejar, almacenar datos geoespaciales permitió la elaboración de la cartografía previa de los deslizamientos. Así también facilitó el análisis y la evaluación de la amenaza en la zona de estudio delimitando los diferentes niveles de afectación: muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto.

2.7. Percepción remota en los estudios de procesos de remoción en masa

Los deslizamientos presentan algunos rasgos en común que permiten su caracterización, a través de las huellas que dejan en las imágenes satelitales (Mantovani et al 1996; Zinck et al., 2001). Así, las imágenes adquiridas después de un desastre, permiten obtener un contraste entre los sitios afectados por deslizamientos y las zonas estables (van Westen et al., 2008).

La percepción remota es otro recurso indiscutible en los estudios de los procesos de remoción en masa (Gómez et al., 2003), y han cobrado mucha importancia en los últimos años en la identificación y mapeo de los peligros por deslizamientos (Nagarajan et al., 1998; Liu et al., 2004; Bathrellos et al., 2009). En efecto, la información recopilada por los sensores remotos a distancia de los elementos bajo estudio, proporciona al operario una visión inmediata y actualizada. Así mismo facilita el análisis de las variables asociado al mismo (Gómez et al., 2003).

Otros recursos importantes de la teledetección son las fotografías aéreas y los modelos digitales de elevación (MDE). Las fotografías aéreas aportan información valiosa en cuanto a cobertura vegetal, inventario de los procesos de remoción en masa y características geológico-estructurales y son muy útiles en el contexto de peligros naturales para determinar áreas prioritarias (Gómez, et al., 2003; Cardozo, 2013). Los MDE contribuyen diferentes atributos primarios provenientes directamente de la superficie (topografía del terreno, concavidad, convexidad, curvatura, etc.), que ayudan a determinar la susceptibilidad del terreno por proceso de remoción en masa (Ochoa tejada y François Parrot, 2007).

2.8. Terminología y conceptos usados en el campo de deslizamiento de laderas

En el campo de los procesos de remoción en masa o inestabilidad de laderas existen múltiples conceptos, definiciones utilizadas por la prensa, autoridades de protección civil, centro nacional de prevención de desastres (CENAPRED), investigadores y la sociedad para referirse al tema de los movimientos del terreno, y al riesgo que presentan para la comunidad humana (CENAPRED,2006).

Es importante conocer los términos y significados para comprender mejor el tema del presente trabajo, por lo que se definen a continuación los términos más usados.

Susceptibilidad

En primera instancia la susceptibilidad es un parámetro que tiene el primer acercamiento hacia el análisis del peligro, debido que debe exponer la zonificación de los deslizamientos de acuerdo con la evolución geomorfológica del relieve (Aristizábal y Yokota, 2006). Soeters y Van Westen (1996) definen la susceptibilidad como la probabilidad de que un fenómeno natural se presente a futuro en un sitio y depende de las condiciones locales de terreno.

Peligro / Amenaza

Describe la probabilidad de la ocurrencia de un evento natural intenso como lluvias torrenciales, deslizamientos de tierra, sismos etc., en el medio ambiente y puede ocasionar daños en la sociedad, a tal magnitud de producir una catástrofe (Díaz Palacios, et al., 2005; Vega y Vega, 2005), dicho fenómeno ocurre dentro de un área determinada y en un determinado período de tiempo (Aristizábal y Yokota 2006; Guzzetti et al. 2006).

Vulnerabilidad

Expresa las características de una persona o grupos sociales, la capacidad de enfrentar, resistir, sobrevivir y recuperarse de un evento natural catastrófico (Blaikie et al., 1996). El CENAPRED (2006) lo describe como el grado de pérdida de un elemento dado o de un conjunto de elementos dentro del área afectada por los deslizamientos. Se expresa en una escala de 0 (ninguna pérdida) a 1 (pérdida total).

Otra definición de vulnerabilidad es dada por Alcántara-Ayala et al. (2003); Vega y Vega (2005); Díaz Palacios et al. (2005); quienes definen la vulnerabilidad como el grado de susceptibilidad de un individuo, grupo de personas, infraestructuras. Frente al impacto de un evento físico externo y la probabilidad de sufrir daño o pérdida (humanas y materiales), posteriormente encontrar dificultades en

recuperarse. Lo detonan la ubicación del área y el uso del suelo, construcciones, viviendas, infraestructura, densidad de la población y la fuerza de organización. Este evento puede ser a nivel nacional o regional, social, institucional, económico, físico-ecológico etc. Es importante señalar que la vulnerabilidad es siempre distinta según la circunstancias de cada persona o grupo social.

Riesgo

El riesgo hace referencia a los efectos perjudiciales o pérdidas potenciales como: vidas humanas, personas heridas, daños al patrimonio, infraestructura, trastornos de la actividad económica y al medio ambiente. Es una función de la amenaza y la vulnerabilidad; y se expresa con la siguiente fórmula: **PELIGRO + VULNERABILIDAD = RIESGO**. Así, una zona altamente riesgosa es donde hay alta vulnerabilidad y alta amenaza (Vega y Vega, 2005; Castillo Navarro, 2010; Cardozo, 2013).

En el mismo sentido, Alcántara Ayala et al. (2003), considera que el riesgo está dado por dos condiciones: la magnitud de la peligrosidad y la vulnerabilidad del medio social donde se desarrolla. Para entender el riesgo asociado a los movimientos de terreno es importante analizar la vulnerabilidad de las poblaciones involucradas, además de contar con un estudio espacial del fenómeno. Los autores señalan que el fenómeno natural sólo será considerado como un riesgo cuando se manifieste en un área donde exista asentamiento humano. Seguidamente el grado de riesgo de la población dependerá de la magnitud de dicho fenómeno junto con el nivel de vulnerabilidad.

2.9. Mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa

El estudio del peligro y el riesgo a deslizamientos cumple una serie de etapas, la identificación de los sitios propensos a deslizarse y la zonificación, son una de las primeras fases más importantes en la prevención y mitigación en la gestión del riesgo (Suárez et al., 2009; Barrantes Castillo et al., 2011). La susceptibilidad por procesos de remoción en masa se entiende como la tendencia de un área a ser perjudicada por futuros movimientos (Guzzetti et al. 1999; 2006; Villacorta et al. 2012), y el término de la zonificación en sentido general, es una división de la

superficie en áreas que muestran diferentes grados de susceptibilidad potencial o actual hacia la ocurrencia de deslizamientos (Cartaya et al., 2008).

Los mapas de susceptibilidad muestran claramente donde se podrían generar nuevos deslizamientos (Spiker y Gore, 2000, 2003), además incluyen la clasificación, el área y la distribución espacial y potencial de los movimientos del terreno (Fell et al., 2008).

Para estimar el grado de susceptibilidad de una zona, se correlacionan los principales factores internos y externos que favorecen a la inestabilidad de ladera, tales como: datos del relieve, litológicos, altitud, precipitación, vegetación, uso de suelo, red de drenaje y otros. Como primer trabajo se analizan los factores existentes y posteriormente se combinan los resultados de este análisis (Guzzetti et al. 1999; 2006; Villacorta et al. 2012)

Los mapas de susceptibilidad son de suma importancia para la toma de decisiones en los procesos de planificación urbana y del medio natural (Bathrellos et al., 2009). Una de sus funciones más relevantes es mostrar los sitios que requieren la realización de estudios específicos y a mayor detalle (zonas prioritarias; Villacorta et al. 2012). Otras funciones son: la determinación de los usos de suelos, un diseño adecuado de obras civiles, planificación correcta de diversas actividades y lo más importante, prevenir el riesgo de los movimientos en masa (Bathrellos et al., 2009).

2.10. Métodos de mapeo de áreas susceptibles a procesos de remoción en masa.

Existen diversas metodologías para determinar la susceptibilidad por procesos de remoción en masa. En los últimos años se han desarrollado varias de ellas, tales como: Determinísticos, Estadísticos, Heurísticos, así como otras técnicas más recientes que incluyen el empleo de los sistemas de información geográfica (Guzzetti et al., 1999; Gómez et al., 2003; Segura et al., 2011). La selección del método depende directamente de las necesidades y el alcance del Geocientífico.

Método Determinístico

Este método trabaja con valores cuantitativos, emplea análisis de la mecánica de suelos (espesor de suelo, presión de poro y resistencia del suelo) y modelos de estabilidad con base física para determinar el factor de seguridad de una ladera específica (Gómez et al., 2003; Cardozo, 2013). Sólo es efectivo en áreas muy pequeñas (una única ladera) y donde los factores intrínsecos son bien conocidos (Gómez et al., 2003). La fiabilidad de los resultados obtenidos con este modelo depende totalmente de la calidad y cantidad de los datos adquiridos, y cuando los datos están incompletos el modelo resulta inconsistente (Dai et al., 2002; Gómez, 2003).

Métodos Estadísticos

EL método estadístico busca una relación entre los factores intrínsecos de la inestabilidad de ladera y la distribución de los movimientos de masa más antiguos y recientes (Van Westen et al., 1997; Guzzetti et al., 1999). Es conveniente aplicarla cuando se dispone de abundante información, tanto cualitativa como cuantitativa, utilizando los modelos estadísticos que pueden ser bivariantes o multivariantes (García Rodríguez, 2008). La confiabilidad de este método depende directamente de la calidad y cantidad de los datos colectados (Dai and Lee, 2002; García Rodríguez, 2008). Por otro lado, los datos necesarios son a veces difíciles de obtener (Gómez et al., 2003).

Método Heurístico

Los métodos heurísticos se basan en ponderar y categorizar los factores responsables de inestabilidad según la influencia esperada en la generación del deslizamiento (Brabb et al., 1972; Nilsen et al., 1979.). Este método es el más subjetivo de todos ya que un experto es el que toma la decisión en la asignación de los valores según el grado de riesgo para una zona (Van Westen et al., 1997). Se pueden distinguir dos tipos de análisis heurístico: el análisis geomorfológico y la combinación cualitativa de mapas (Segura et al., 2011): (1) El análisis geomorfológico, conocido también como método de cartografía directa, donde la susceptibilidad de terreno es determinada directamente en el campo y se basa en la experiencia del especialista; (2) La combinación cualitativa de mapas, en este

método, el investigador usa su criterio experto para asignar los pesos (valores que indican un determinado grado de importancia) a las variables representativas de los factores causantes de los deslizamientos.

Dentro del método heurístico se encuentra el método de *Mora y Vahrson (1994)*, posteriormente modificado por Mora et al. (2002). La metodología propuesta por Mora y Vahrson fue desarrollada en la universidad de Costa Rica y publicada en el *Bulletin of the Association of Engineering Geologists* vol. XXXI (1994), es empleada para macro-zonificación de amenaza por deslizamientos en zonas tropicales sísmo-tectónicamente activas (García Rodríguez, 2008). En ella se propone la preparación y combinación de mapas temáticos de diversos indicadores morfodinámicos que pueden ser trabajados en un sistema de información geográfico (SIG) para obtener un mapa de susceptibilidad a deslizamientos. Este método refleja los factores que actúan sobre las fuerzas que generan el deslizamiento (lluvias y sismos) y los factores que incrementan la susceptibilidad de las laderas a deslizamientos (relieve, litología y humedad; García Rodríguez, 2008). Se utiliza la opinión de expertos para asignar los pesos a una serie de parámetros contenidos en los mapas temáticos (Segura et al., 2011; Barrantes Castillo et al., 2011). Dicha técnica ha obtenido suficiente popularidad en la determinación de áreas bajo amenaza por movimientos de terreno principalmente en los países de Centro América, por ejemplo en Costa Rica, Nicaragua, Guatemala y El Salvador llegándose a alcanzar resultados satisfactorios. Su mayor problema es que la asignación exacta de pesos a los diversos parámetros se basa en ocasiones en el insuficiente conocimiento de campo de los factores decisivos. (Gómez et al., 2003; Barrantes Catillo et al., 2011; Segura et al., 2011).

CAPITULO III. CARACTERIZACIÓN DEL ENTORNO FÍSICO DEL ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Localización

La zona de estudio se ubica en el Centro-Sureste de la República Mexicana, ocupando sectores de los Estados de Hidalgo, Puebla y Veracruz (Figura 3.1),

dentro de la parte más septentrional de la llamada “Sierra Norte de Puebla”; fisiográficamente se localiza sobre tres provincias: La Sierra Madre Oriental, La Llanura Costera del Golfo Norte y el Cinturón Volcánico Transmexicano. En un contexto Hidrográfico el área de interés está delimitada por la subcuenca del río San Marcos y comprende territorio de los municipios de Pahuatlán del Valle, Naupan, Tlacuilotepec, Xicotepec, Honey, Jalpan, Zihuateutla, Huauchinango y Venustiano Carranza, todos del estado de Puebla; Poza Rica, Coatzintla y Coyutla del estado de Veracruz; Tenango de Doria y Acaxochitlán del estado de Hidalgo.

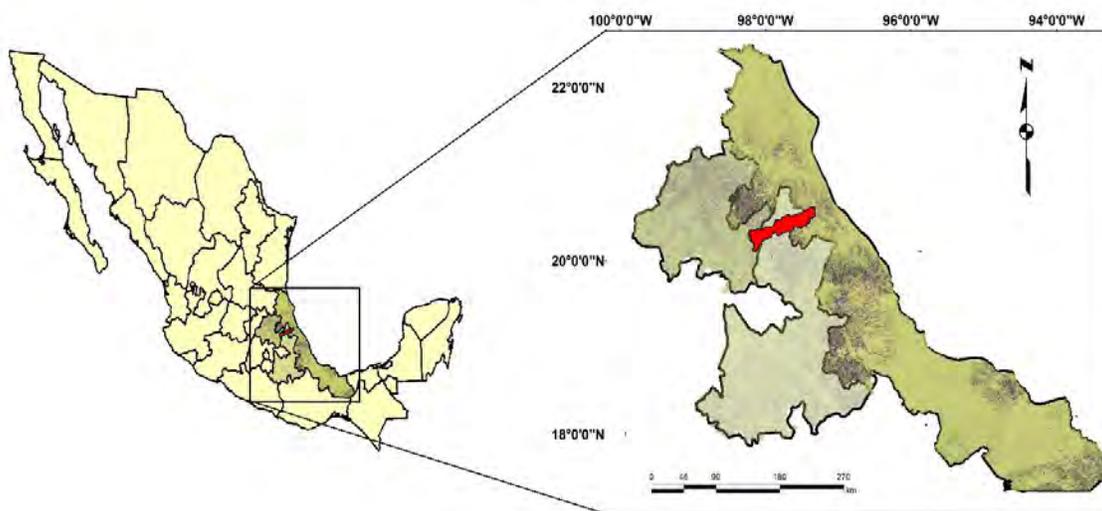


Figura. 3.1. Ubicación geográfica de la subcuenca del río San Marcos.

3.2. Población

La subcuenca del río San Marcos ocupa una superficie de 1635.23 km², está conformada por 289 localidades y 342,058 habitantes de los estados de Puebla, Hidalgo y Veracruz (figura 3.2, INEGI, 2010). Los municipios que conforman el área de interés en su mayoría integran población indígena de los grupos Náhuatl, Otomí, y Totonaca. Dichos grupos poblacionales están catalogados con un alto grado de marginación, gran parte de la población carece de servicios básicos, estudio, trabajo y vivienda digna (Programa de ordenamiento ecológico del territorio de la cuenca del río Tuxpan, 2009, POETCRT); Programa regional de desarrollo, región Sierra Norte; 2011-2017, PRDRSN).

Las actividades económicas predominantes para esta región son la agricultura, ganadería y pesca, los productos principales son el maíz, frijol, chile, café, la caña de azúcar y los cítricos. La actividad económica es complementada con otras actividades como la fabricación de artesanías y el trabajo asalariado (POETCRT, 2009; PRDRSN, 2011-2017) En los últimos años, la zona norte de la Sierra Norte de Puebla, se ha caracterizado por un crecimiento en la actividad eco-turística.

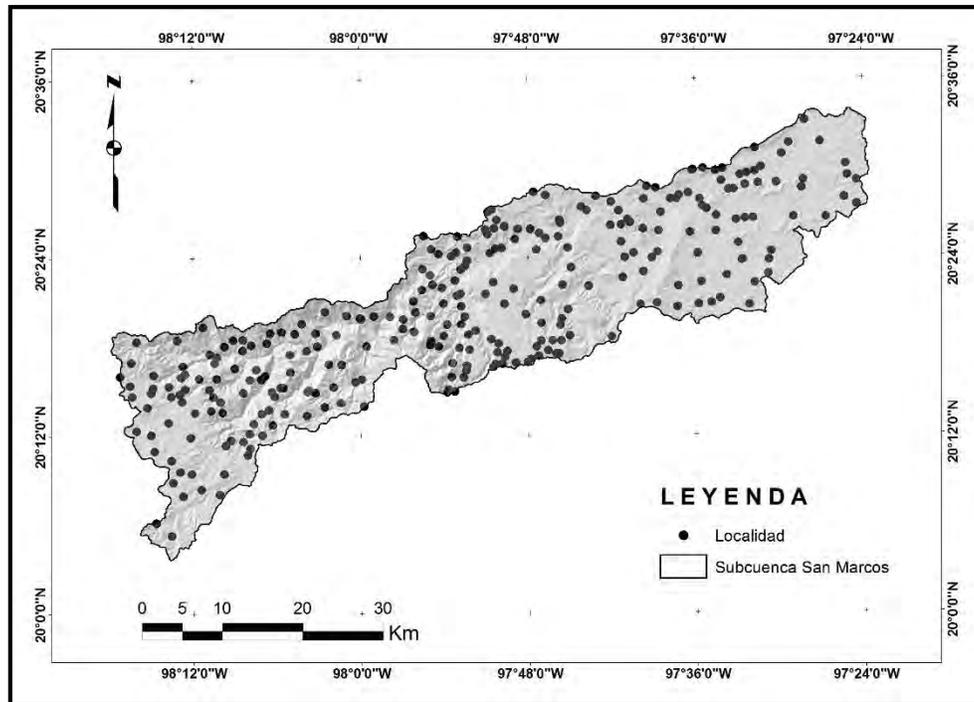


Figura 3.2. Población dentro de la subcuenca San Marcos (INEGI, 2010)

3.3. Marco geológico regional

La Sierra Norte de Puebla se encuentra mayormente incluida dentro de la Provincia fisiográfica de la **Sierra Madre Oriental** (SMO, Figura 3.3), la cual representa a una cordillera o macizo montañoso, rugoso, estrecho y extenso, cuyo relieve se debe a la deformación de rocas mesozoicas, incluido su basamento heterogéneo, lo cual fue levantado, comprimido, fracturado y transportado hacia el noreste, durante esta actividad se produjeron pliegues y cabalgaduras, mayormente durante la Orogenia Laramide (Eguiluz et al., 2000; Carrasco Velázquez et al., 2009). Este rasgo orográfico se ubica al noreste de la República Mexicana, al este limita con la Planicie Costera del Golfo, hacia el sur con la Faja

Volcánica Transmexicana, al oeste con el Altiplano Mexicano y se extiende hacia la frontera norte del país. Las altitudes de las cumbres sobrepasan los 2500 msnm, tiene una longitud más de 800 km y una anchura de 80 a 100 km. Su geología corresponde principalmente de rocas sedimentarias de origen marino, constituidas por rocas jurásicas y cretácicas deformadas y plegadas a finales del Mesozoico y principios del Terciario, incluye calizas, areniscas y lutitas como rocas predominantes en esta provincia geográfica (De la Llata Romero, 2011).

Otras fisiografías que forman el territorio de la Sierra Norte de Puebla son el **Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM) y la Llanura Costera del Golfo Norte**. La primera de éstas es una faja volcánica de 1000 km de longitud y un ancho variable entre 80 y 230 km aproximadamente, cuyo origen se debe a la subducción de las placas oceánicas Rivera y Cocos, por debajo de la placa de Norteamérica, a lo largo de la costa del Pacífico (Cano, 2007; Ferrari et al., 2011). El CVTM atraviesa el centro de México y se extiende en dirección este-oeste (Cano, 2007; Ferrari et al., 2011), sepultando las rocas mesozoicas con potentes depósitos volcánicos del Neógeno - Cuaternario (Lugo- Hubp et al., 2005).

La Llanura Costera del Golfo Norte se extiende paralela a las costas del Golfo de México, desde el Río Bravo hasta el Cinturón Volcánico Transmexicano. Su formación se debe a la acumulación de una gran cantidad de sedimentos detríticos, producto de la erosión de los terrenos accidentados que comenzaron a levantarse desde finales del periodo Cretácico. Está constituida principalmente por materiales sedimentarios marinos no consolidados que van desde el Cuaternario, hasta del Cretácico (arcillas, arenas, conglomerados), cuya edad incrementa conforme se aleja de la costa (POETCRT, 2009; PRDRSN, 2011-2017).

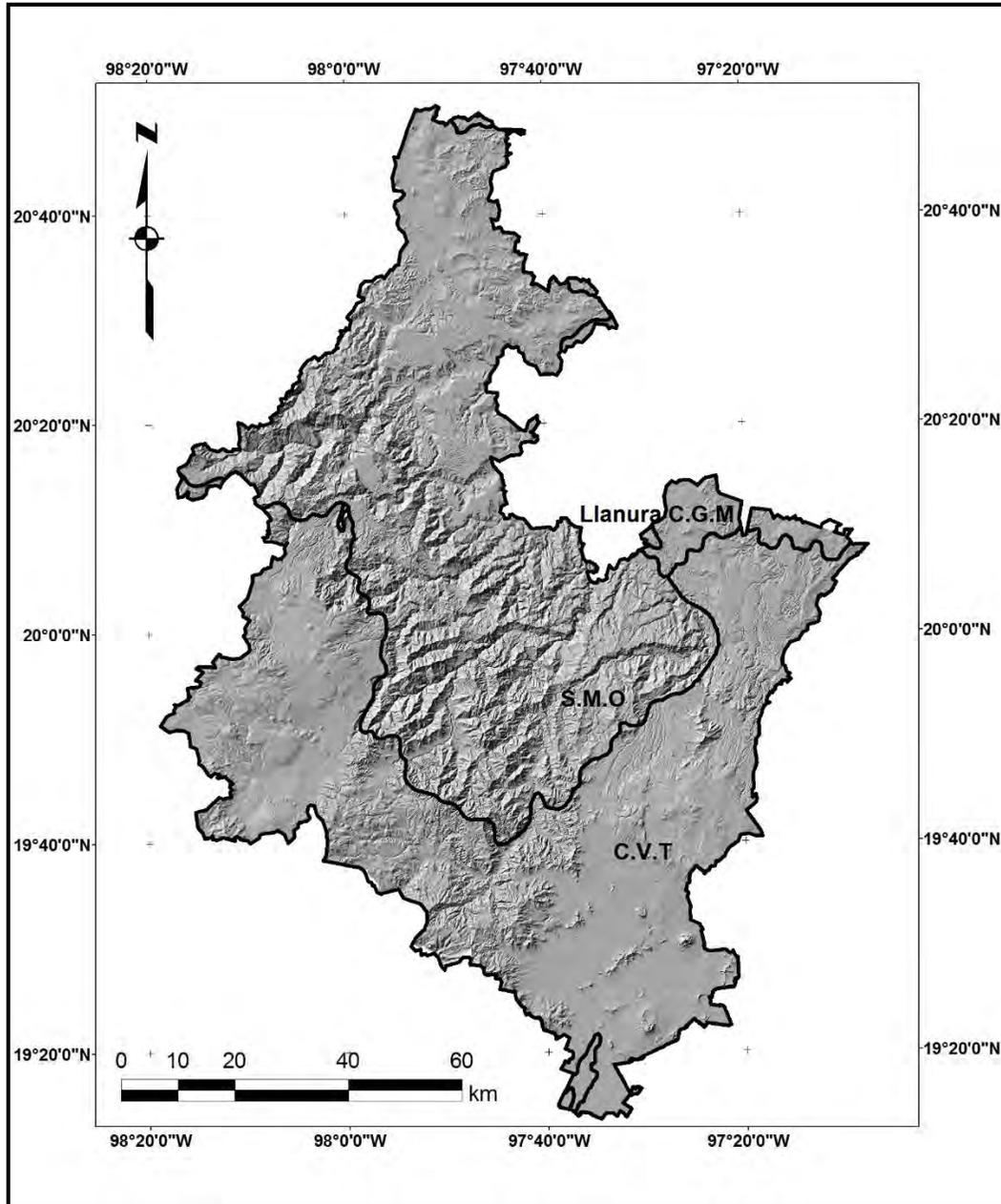


Figura 3.3. Provincias fisiográficas que integran la Sierra Norte de Puebla.

3.4. Geología de la subcuenca San Marcos

La geología de la zona de estudio forma parte de la Sierra Norte de Puebla, la cual es una transición de las provincias fisiográficas: SMO, CVTM y la Llanura Costera del Golfo Norte. Se presentan litologías variadas, debido a los complejos orográficos que lo conforman (Borja Baeza y Alcántara Ayala, 2004; Lugo Hubp et al., 2005; Capra et al., 2006; Borja Baeza, 2012). Las edades de las unidades

geológicas van del Paleozoico al Cuaternario y está compuesta principalmente por rocas sedimentarias plegadas mesozoicas, cubiertas por espesores de más de 10 m, de depósitos y derrames volcánicos del Plioceno - Cuaternario; las rocas más recientes están compuestas por unidades provenientes de la caldera de Los Humeros, Puebla (Borja Baeza y Alcántara Ayala, 2004; Lugo Hubp et al., 2005; Capra et al., 2006; Borja Baeza, 2012).

3.4.1. Estratigrafía

La secuencia estratigráfica que aflora en la zona de estudio, está constituida por un basamento complejo, por rocas sedimentarias plegadas y por rocas volcánicas recientes (Lugo Hubp et al., 2005; Hernández Mena, 2008; Borja Baeza, 2012). La edad de los afloramientos rocosos que se disponen dentro de la subcuenca San Marcos, van desde el Mesozoico al Cenozoico, las unidades más antiguas emergen hacia el noroeste de la zona de estudio, mientras que las más jóvenes una porción se ubica al este y otra al oeste de la misma. La estratigrafía de la zona de estudio, se realizó con base a los trabajos publicados por varios autores: (Segerstrom, 1956; Carrillo Bravo, 1961, 1965; López Ramos, 1979; Lugo Hubp et al., 2005; Hernández Mena, 2008; Borja Baeza, 2012 y las cartas del sistema Geológico Mexicano SGM, 1997, 2004).

ERA	ÉPOCA		COLUMNA	CLAVES CARTOGRÁFICAS	Ma	
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO		Qhoal	0.01	
		PLEISTOCENO		Tpl-QB TplTR-TDa TplQptB	1.68	
	TERCIARIO	SUPERIOR	PLIOCENO			5.1
			MIOCENO		TmCgp-Ar Fm. Escolin	24.0
		INFERIOR	OLIGOCENO		ToAr-Lm Fm. Mesón ToAr-Lu Fm. Palma Real	36.0
			EOCENO		TeLu-Ar Fm. Guavabá TpacAr-Lu Fm. Chicontepec	55.0 67.0
	MESOZOICO	CRETÁCICO	SUPERIOR	MAASTRICHTIANO	1 KsLu-Cz Fm. Soyatal-Mezcala	89.0
				CAMPANIANO	2 KcesCz-Lu Fm. San Felipe Fm. Agua Nueva	91.0
				SANTONIANO		97.5
				CONIACIANO		
INFERIOR			TURONIANO			
			CENOMANIANO			
			ALBIANO	1 KiCz		
			APTIANO			
NEOCOMIANO		BARREMIANO	2 KbecCz-Lu Fm. Tamaulipas indiferenciado Fm. Santuario	124.0		
		HAUTERIVIANO				
JURÁSICO		SUPERIOR	TITHONIANO	PORTLANDIANO	1 JoKbeCz-Lu Fm. Santiago Fm. Tamón Fm. Pimienta	140.0 145.0
				KIMMERIDGIANO	2 JkLu-Cz Fm. Santiago Chicaco	154.0
			OXFORDIANO		160.0	
		MEDIO	CALLOVIANO			
	BATHONIANO		JmLu-Ar Fm. Cahuasas	166.0		
	BAJOCIANO					
INFERIOR	AALENIANO			183.5		
	TOARCIANO					
	PLIENSBACHIANO	JiLu-Ar Fm. Huayacocotla				
	SINEMURIANO					
TRIÁSICO	SUPERIOR		TRsLu-Ar Fm. Huizachal	210.0		
				230		

Figura 3.4. Columna estratigráfica de la zona de estudio, compilada y modificada del SGM (1997,2004).

A continuación se enlistan y describen las principales unidades estratigráficas que afloran en el área y que tienen alguna relación con el presente estudio.

Mesozoico

Triásico Superior- Jurásico Inferior

Formación Huizachal

Esta Formación aflora al sur-oeste de la subcuenca del río San Marcos; Carrillo Bravo (1961) expone el nombre de Formación Huizachal para una secuencia de lutita, lutita arenosa, arenisca y conglomerado de color rojizo, verde y gris verdoso, y establece una edad Triásico superior-Jurásico inferior. Cubren en discordancia angular a sedimentos paleozoicos y a rocas de probable edad pre-cámbrica, y subyacen en discordancia angular a una delgada sección de sedimentos rojos de la Formación La Joya, a calizas oxfordianas de la Formación Zuloaga o capas yesíferas de la Formación Olvido.

Jurásico Inferior

Formación Huayacocotla

Al este de la subcuenca San Marcos afloran las rocas de la Formación Huayacocotla del Jurásico inferior, consiste en terrígenos de grano grueso en la base y hacia la cima se compone de areniscas de grano fino en alternancia con lutitas (SGM, 1997). La Formación Huayacocotla subyace a la Formación Cahuascal y sobreyace a la Formación Huizachal (Arenas Islas et al., 2009).

Jurásico Medio

Formación Cahuascal

Dentro del área de estudio esta secuencia aflora en dirección NW. La Formación Cahuascal está constituida por una alternancia de lutitas, limolitas, arenisca y conglomerado de color rojo (SGM, 1997). El espesor de los estratos varía de 20 a 90 cm. Se encuentra aflorando en la porción central de la Sierra Madre Oriental y en la profundidad de la Cuenca Tampico-Misantla. Está cubierta en forma transicional por un paquete representado por las Formaciones Santiago, Tamán y Pimienta. En los alrededores de Tanguistengo, Hidalgo, la Formación Cahuascal

descansa discordantemente sobre la Formación Tamán y cubre también discordantemente a la Formación Huayacocotla (Carrillo- Bravo, 1965).

Jurásico Superior

Formación Santiago, Tamán, Chipoco y Pimienta

En el noroeste de la zona de estudio afloran las Formaciones: Santiago, Tamán, Chipoco y Pimienta, los cuales se han agrupado en un solo paquete, debido a la dificultad para su diferenciación (Azpeitia Caballero, 2007). La primera de ellas está compuesta por limolitas negra calcárea (Azpeitia Caballero, 2007), y las restantes son representadas por calizas de grano grueso, limolita, lutita, caliza arcillosa, lutita carbonosa y calcárea con algunos horizontes de terrígenos, lentes y capas de pedernal y concreciones calcáreas (Heim, 1926; Cantú, 1971). La Formación Trancas y Tepexic se correlacionan en edad con las Formaciones previamente descritas, sin embargo no se observan en la zona de interés (SGM, 1997; Segerstrom, 1956).

Cretácico Inferior

Formación Santuario

La Formación Santuario sobreyace a la Formación Trancas y está formada por calizas alternadas con grauvacas, lutitas, caliza arcillosa y marga (Segerstrom, 1961; SGM, 1997). Esta Formación aflora en el centro-noroeste de la zona de estudio, y consiste en calizas intercaladas con lutitas.

En esta misma edad se tienen formaciones correlacionables entre sí, por ejemplo: El Doctor, con calizas; Tamabra, calizas, alternando con litoclastos y brechas calcáreas; El Abra, calizas masivas; Tamaulipas superior e inferior, calizas con nódulos y lentes de pedernal, estas afloran en la parte centro-norte del estado de Hidalgo (SGM, 1997).

Cretácico Superior

Formación San Felipe, Agua Nueva, Soyatal y Mezcala

En la zona de estudio, estas Formaciones fueron agrupadas por la similitud de su litología, sus escasos afloramientos en la zona, espesores restringidos y por la escala a la cual se cartografió (SGM, 2004). Se compone de un paquete de flysch, constituido por lutitas, marga y unidades de caliza arcillosa con abundancia de microfósiles (Carrillo y Suter, 1991). El espesor de sus estratos varían de 5 a 40 cm. Subyace concordantemente a la Formación Méndez formada por lutita y marga. Estas formaciones se observan al centro-suroeste de la subcuenca, y lo constituyen caliza lutita y lutita caliza. (SGM, 1997, 2004).

CENOZOICO

Paleógeno-Eoceno

Formación Chicontepec

Aflora en el noreste de la subcuenca del río San Marcos, ocupa casi el 50% del territorio de la misma. Esta formación se encuentra desde el sureste de San Luis Potosí y hasta cerca de Teziutlán, Puebla, sin embargo su mayor desarrollo se concentra en la cuenca de Chicontepec (Nava y Alegría, 2001); está constituida por grandes volúmenes de sedimentos intercalados con areniscas arcillosas, limolitas y lutitas del Paleoceno-Eoceno, descansa algunas veces en forma discordante sobre la Formación Méndez del Cretácico Tardío y están cubiertas a su vez por sedimentos arcillosos de las formaciones Aragón o Guayabal del Eoceno (PEMEX, 2013). La Formación Chicontepec se encuentra dividida en tres partes: Chicontepec Inferior, Chicontepec Medio y Chicontepec Superior, estas tres divisiones actualmente son consideradas como formaciones por sí solas, ya que reúnen los rasgos estratigráficos que aprueban su separación (López-Ramos, 1979). Las unidades sedimentarias subsecuentes a la Formación Chicontepec representadas por las formaciones Guayabal, Chapopote-Tantoyuca, Palma Real, Escolín y Tuxpan contienen litologías muy similares que consisten en areniscas, lutitas y limolitas y por su medio ambiente de depósito sus contactos son discordantes (SGM, 2004).

Neógeno

El Neógeno está representado principalmente por rocas volcánicas, a diferencia del Mesozoico, en el cual abundan rocas sedimentarias marinas y continentales. El vulcanismo está bien representado en la zona por derrames basálticos del Mioceno y Pleistoceno, cuyos afloramientos varían en su extensión de 10 km (al sur de Martínez de la Torre), hasta 55 kilómetros al norte de Villa Ávila Camacho, así como por tobas de composición riolítica a dacítica que cubren de manera discordante a todo el paquete sedimentario. Estas unidades afloran en la porción oeste del área de estudio.

Cuaternario

Parte de los depósitos cuaternarios se ubican en la costa, la cual se formó como resultado del desarrollo fluvial-deltáico de los ríos Tuxtla, Cazones, Tecolutla y Bobos, entre otros. En dirección noreste de la subcuenca del río San Marcos se presenta una porción de aluvión, sobre todo en las terrazas aluviales hacia las zonas más bajas de los valles.

3.5 Geomorfología

La subcuenca del río San Marcos se encuentra dominada por una topografía diversa, según el reporte del Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio de la Cuenca del Río Tuxpan, (POETCRT, 2009), la geomorfología de la subcuenca está regida por las provincias geográficas que lo conforman. Con elevaciones bajas y en algunas partes irregular por Lomeríos de Plegamiento, pertenece a la Llanura Costera del Golfo; la parte NE-SO lo constituye la SMO, que consiste en sierras individuales, paralelas, comprimidas unas con otras, bastante irregular y accidentada, suelen formar grandes o pequeñas altiplanicies intermontañas que aparecen frecuentemente escalonadas hacia la costa. También se caracteriza por sus numerosas chimeneas volcánicas, asociadas al CVTM.

En su conjunto la subcuenca está formada por montañas, relieve Kárstico, valle aluvial, planicie aluvial, valle de montaña con intensa erosión, valle estructural y de contacto litológico y valle intermedio con moderada erosión (POETCRT, 2009).

Debido a la situación geográfica de la zona de estudio, se tiene un rango de altitud que va desde los 12 hasta 2882 msnm (ASTER GDEM, 2011). En los municipios de Honey y Pahuatlán se localizan las regiones más altas de la cuenca; las zonas de menor altura se presentan en primer lugar en la población de Francisco Z. Mena seguido de Pantepec, Venustiano Carranza y Poza Rica, Veracruz.



Figura.3.5 Vista en perspectiva de un sector de la subcuenca San Marcos, mostrando la geomorfología escarpada y montañosa con valles fluviales en las partes bajas (tomado de Google Earth, 7-3-2012).

3.6 Clima

El clima de la zona de estudio está establecido por los cambios topográficos y por su ubicación frente al Golfo de México. Por esta razón, el clima varía desde los climas templados hasta los cálidos (figura 3.6).

En las partes más altas de la sierra, con altitud que van de 2000 a 2500, donde se ubican los municipios de Pahuatlán, Honey, Huachinango y otros, predomina principalmente el clima templado húmedo con lluvias todo el año y lluvias en verano; la temperatura media anual varía entre 12°C y 18°C, la precipitación anual fluctúa entre 1500 y 2500 mm anual; en la misma dirección se presenta clima templado subhúmedo con lluvias en verano y en un área muy pequeña al noroeste de la subcuenca se tiene el clima frío. (INEGI, 2010; POETCRT, 2009; PRDRSN, 2011-2017).

El centro de la zona de estudio, donde se concentran los municipios serranos predomina el clima semicálido húmedo con lluvias todo el año, temperatura media anual mayor de 18° C. Cabe resaltar que esta zona es la más lluviosa y húmeda de la subcuenca San Marcos, debido que la Sierra Madre Oriental forma una pared orográfica que obstruye los vientos provenientes del Golfo de México, por lo tanto al chocar los vientos con la sierra y elevarse este deja caer en forma de lluvia gran parte de su humedad (POETCRT, 2009; PRDRSN, 2011-2017). A partir de esta región, con dirección hacia Golfo de México (NE) las elevaciones topográficas cada vez son más bajas y los climas más cálidos. Dos tipos de clima son los que predominan en esta porción: cálidos húmedos con lluvias todo el año y con abundantes lluvias en verano, estas lluvias junto con las que se presentan en otros periodos del año dan un total precipitado cercano a los 2000 mm al año; los termómetros en esta zona marcan arriba de los 22° C, y el clima es cálido subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual oscila entre 24 a 26 °C y la precipitación total anual va de 1200 a 1500 mm, que en su mayoría pertenece el territorio del estado de Veracruz. (INEGI, 2010; POETCRT, 2009; PRDRSN, 2011-2017).

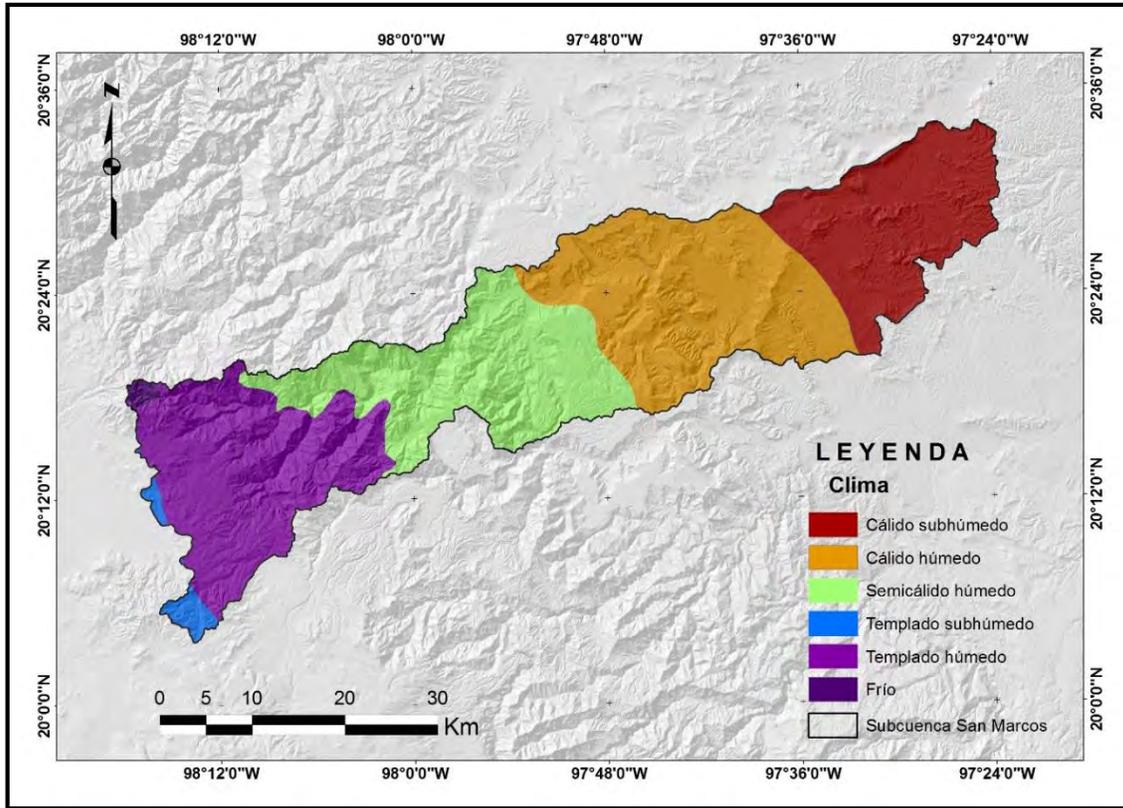


Figura 3.6. Mapa de climas de la subcuenca San Marcos, (INEGI, 2010).

3.7 Vegetación

En la subcuenca del río San Marcos existe diversidad de vegetación, aunque predominan: el Bosque Mesófilo de montaña y la Selva Alta Perennifolia; a diferencia de los Bosques de Pino-Encino, Bosque de Encino y Bosque de Oyamel, que solo llegan a ocupar una mínima fracción del territorio de la zona de interés (figura 3.7).

El Bosque Mesófilo de montaña se localiza en las partes más altas del área de estudio, en ambientes con mayor contenido de humedad y neblinas abundantes; este ecosistema vegetal se caracteriza por la presencia de vegetación arbórea y helechos, sus raíces pueden llegar a medir de 1 a los 4 metros, por lo que funciona bien para retener el suelo. La selva alta perennifolia contiene plantas que se desarrollan en climas semicálido y cálidos húmedos, estas condiciones climáticas favorecen el crecimiento de una vegetación densa y alcanzan una altura que va de los 25 a los 40 metros (Castelán Vega et al., 2014; INEGI, 2010).

La Selva alta Perennifolia y el Bosque Mesófilo de montaña presentan evidencia de degradación, debido a su deforestación para la agricultura temporal como cultivos de maíz, frijol, café, así como los pastizales cultivados e inducidos. Otro factor relevante que ha incrementado su degradación es el uso doméstico de diversas especies vegetales (Castelán Vega et al., 2014).

Los Bosques de Pino-Encino, Bosque de Pino y Bosque de Oyamel son ecosistemas que crecen en climas frío y lluvioso, en algunos municipios esta flora es la que ha sido reemplazado en gran parte por cultivos temporales, debido a los altos contenidos de materia orgánica que se presenta en este tipo de suelo y benefician el desarrollo de cultivos (Castelán Vega et al., 2014; INEGI, 2010).

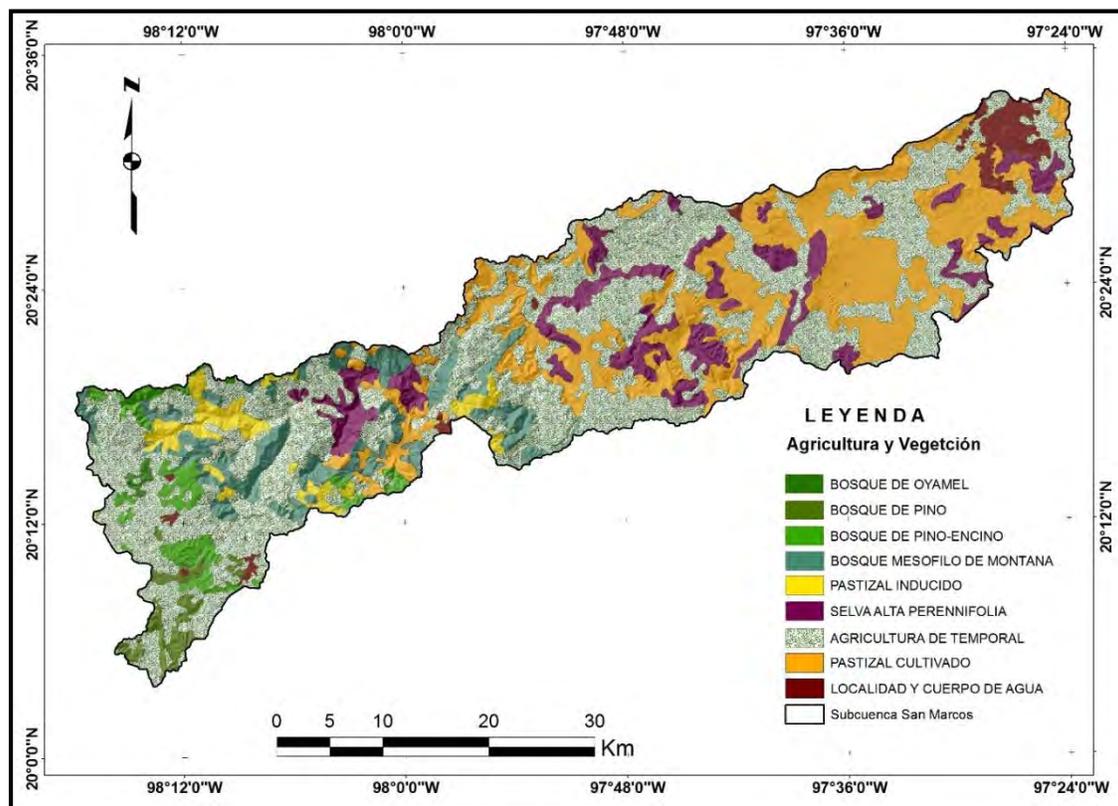


Figura 3.7. Mapa de Vegetación y Agricultura de la subcuenca San Marcos (INEGI, 2010).

CAPITULO IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el desarrollo de este trabajo, se realizó una búsqueda y revisión bibliográfica, selección y análisis de la información. Los temas que se indagaron

fueron: contexto geológico, geomorfología, climatología del área, gestión de riesgo, morfometría de la cuenca, manejo de recursos naturales, métodos para determinar la susceptibilidad a procesos de remoción en masa y otros. Para esto, se ha tenido acceso a publicaciones científicas, notas periodísticas, tesis, y conferencias.

Así mismo para la obtención de los datos vectoriales (shapefile) y datos raster, se han consultado páginas de instituciones gubernamentales, por ejemplo: Instituto Nacional de Estadística y Geográfica (INEGI), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), Servicio Geológico Mexicano (SGM), USGS Global Visualization Viewer (GLOVIS) y Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM). Los recursos de internet: mapa digital de México en línea a escala 1:250 000 (INEGI) y Google Earth, fueron también de suma utilidad.

Las herramientas computacionales mayormente utilizadas fueron: Arc GIS 9.3 (ESRI), ENVI 4.3, Surfer 11, estas asumieron mucha importancia en el trabajo, ya que gracias a ellos se logró analizar los datos espaciales y elaborar los mapas temáticos de manera rápida, segura y confiable. Para la redacción y el formato de las referencias incluidas en esta investigación, se empleó la propuesta de la American Psychological Association (APA).

4. 1. Descripción de los materiales

4.1.1. Carta Geológica

Se utilizaron archivos digitales del formato (PDF) del servicio Geológico Mexicano (SGM), con claves (F14-12) Poza Riza Veracruz y (F14-11) Pachuca Hidalgo, ambas con escala 1:250,000.

4.1.2. Cartografía Vectorial

Para este trabajo, fue esencial el uso de los productos vectoriales proporcionadas por INEGI, tales como: la cartografía de clima y fisiografía, ambas con una escala de 1:1,000,000, cartas topográficos (localidades, caminos, carreteras, curvas de nivel, toponimia), vegetación y uso de suelo con una escala de 1:250 000. Con

esta información se elaboraron mapas temáticos que permitieron describir el entorno físico de la zona de estudio.

Es importante mencionar que la información cartográfica dada por INEGI se encuentra en proyección Cónica Conforme de Lambert, misma que fue re-proyectada al sistema WGS-84-UTM-Zona 14 N.

4.1.3. Modelos digitales de elevación (DEM)

Un modelo digital de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés) es una representación de raster de la superficie terrestre y se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de las cotas topográficas (Vílchez, 2000; Arc gis Resource Center, 2015).

Los DEM cobran mucha importancia en los estudios Geomorfológicos, Morfométricos, Geológicos y en general en el manejo y administración del territorio (Soriano Franquet, 2009; Mena Frau, et al. 2011), ya que sus resultados permiten cualificar y cuantificar las características propias del terreno (Mena Frau, 2011).

Se utilizó un DEM obtenido de la página (ASTER GDEM) con una resolución espacial de 30 metros. Este modelo de elevación digital ASTER GLOBAL, es un producto desarrollado y puesto a disposición del público por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria (METI) de Japón y de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA).

4.1.4. Imagen satelital Landsat TM 5

Fue en 1972, cuando se inició el programa LANDSAT, que consiste en una serie de misiones satelitales de observación terrestre (Pernía, 1999), fue el primer satélite enviado por los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos planetarios. Inicialmente se le llamó ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite) y posteriormente los restantes recibieron el nombre de LANDSAT (INEGI, 2015).

LANDSAT TM-5 fue lanzado en 1984 con un sensor TM (del inglés, Thematic Mapper) y actualmente es administrado por la NASA (National Space and Space Administration) y el Servicio Geológico de E.E.U.U. (U.S. Geological Survey) (INEGI, 2015). Opera simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres

en el visible (0.45 a 0.69 μm), una en el infrarrojo cercano (0.76 a 0.90 μm), dos en el infrarrojo medio (1.55-2.35 μm), todas con una resolución espacial de 30 m; y una en el infrarrojo termal (10.4-12.5 μm), con 120 m de resolución espacial (Reuter, 2009; INEGI, 2015). Cada imagen cubre 185 x 185 km (escena completa) aproximadamente pero también es posible fraccionarlas en cuadrantes (1/4 de escena, 90 x 90 Km) o mini escenas de 50 x 50 Km (Reuter, 2009; INEGI, 2015).

Para este estudio se han utilizado dos escenas de Landsat Thematic Mapper 5, de fechas (19-09-1999 y 15-11-1999) obtenida a través del banco de imágenes Earth Explorer de la USGS Global Visualization Viewer (GloVis). La localización de las escenas corresponde con el path y row (26/46 y 25/46) del Landsat Worldwide Reference System (WRS).

Otro recurso empleado son las imágenes extraídas de Google Earth de fechas (7-3-2012 y 19-1-2014), estos ayudaron a identificar las zonas más críticas del área de estudio y a realizar una cartografía previa de los procesos de remoción en masa.

4.1.5. Datos de precipitación

Para elaborar el mapa de precipitación, se utilizó la información climatológica de la Comisión Nacional de Agua (CONAGUA). Se consultaron 16 estaciones meteorológicas que corresponden a los años 1998 y 1999, dichas estaciones se ubican dentro y en los alrededores de la zona de estudio (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Estaciones meteorológicas utilizadas, (CONAGUA, 1998, 1999).

N. DE ESTACIONES	NOMBRE DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA
13095	AGUA BLANCA
13099	METEPEC
13034	TENANGO DE DORIA
21147	APAPANTILLA
21118	HUAUCHINANGO
21127	XICOTEPEC DE JUAREZ
30132	POZA RICA
30134	PROGRESO DE ZARAGOZA
13082	PRESA LA ESPERANZA
13093	VENADOS
21211	AMELUCA

21051	JOPALA
30034	COYUTLA
30058	ESPINAL
30173	TECUANTEPEC
13061	ALCHOLOYA
21142	VENUSTIANO CARRANZA

4. 2. Descripción de los métodos

4.2.1. Análisis morfométrico de una subcuenca

Se ha integrado el análisis morfométrico de la subcuenca San Marcos para caracterizar a detalle las zonas más susceptibles a derrumbes debidos a la geomorfología propia de la región. Además nos permite entender la condiciones naturales (relieve, suelo, clima y vegetación), así como valorar y exponer las externalidades resultantes de los diferentes usos de suelo (Cotler y Priego, 2004). Por esta razón se entiende que las cuencas hídricas establecen un marco apropiado para el análisis de los procesos ambientales generados como consecuencia de las decisiones en materia de uso y manejo de recursos naturales (Cotler y Priego, 2004).

Muchos autores han desarrollado métodos para extraer automáticamente datos morfométricos de una cuenca a partir de un MDE y la mayoría de ellos funcionan en el entorno de los SIG.

Para la obtención de los datos morfométricos de la subcuenca San Marcos se emplearon las herramientas siguientes: Hydrology, Field calculator, Zonal Statistics as table, desarrollado en Arc Gis 9.3, que permiten la extracción automática de los parámetros morfométricos generando a partir del modelo digital de elevación (MDE) y los restantes fueron creados a partir de una serie de operaciones matemáticas aplicando formulas correspondientes para cada parámetro en Office Excel. Los parámetros obtenidos fueron los siguientes (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Parámetros morfométricos calculados de la subcuenca San Marcos.

Parámetro	Símbolo	Fórmulas	Definición
Superficie			
Área	A		
Perímetro	P		
Índice de forma	Rf	$K_f = \frac{A}{L^2}$	A= Área de la cuenca L ² = Longitud del curso principal
Coefficiente de compacidad	Kc	$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	P= Perímetro A= Área de la cuenca
Coefficiente de masividad	Km	$CM = \frac{\mu}{u}$	u= Altura media de cuenca μ= Área de la cuenca
COTAS			
Cota mínima	Z		
Cota máxima	Z		
Desnivel	msnm		
ALTITUD			
Altitud media			
PENDIENTE			
Pendiente promedio de la cuenca			
DE LA RED HÍDRICA			
Longitud del curso principal	Cm		
Orden de la red hídrica	N		
Longitud de la red hídrica	Ct		
Pendiente Promedio de la Red Hídrica		3	
PARAMETROS GENERADOS			
Tiempo de concentración	tc	$13.548 * \left(\frac{L^2}{H}\right)^{0.77}$	L=Longitud del cauce principal H= Diferencia de alturas
Pendiente del cauce principal	S	$S = \frac{H}{L}$	H= Diferencia de alturas L= Longitud del cauce
Densidad de Drenaje	Dd	$Dd = \frac{L}{A}$	L= longitud de las corrientes A= Área de la cuenca

Fuente: Gravelius (1914), Hortón (1945), Fuentes Junco (2004), Delgadillo y Páez (2008).

Paralelamente se ha analizado la morfometría de la subcuenca del río Tehuantepec ubicado al sur de la zona de estudio, dentro de la Sierra Norte de Puebla. En esta zona hidrográfica se han presentado cientos de fenómenos de remoción en masa principalmente en los municipios de Zapotitlán de Méndez, Tetela de Ocampo y Cuetzalán del Progreso, mismos que han sido estudiados por varios autores, entre ellos: (Flores Lorenzo y Alcántara Ayala, 2002; Capra et al., 2003; Lugo Hubp et al., 2005; Cuanalo et al., 2006 y Hernández Mena, 2008).

El objetivo de analizar y obtener las características morfométricas de la subcuenca Tehuantepec es, pensando que las condiciones geomorfológicas de los deslizamientos ocurridos en dicho sitio podrían ser similares a las condiciones que conducirían a la inestabilidad de laderas en nuestra zona de interés.

Tabla 4.3. Paramétros morfométricos calculados de la subcuenca Tehuantepec.

Parámetro	Símbolo	Fórmulas	Definición
Superficie			
Área	A		
Perímetro	P		
Índice de forma	Rf	$K_f = \frac{A}{L^2}$	A= Área de la cuenca L ² = Longitud del curso principal
Coefficiente de compacidad	Kc	$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$	P= perímetro A= Área de la cuenca
Coefficiente de masividad	Km	$CM = \frac{\mu}{u}$	^a = Altura media de cuenca μ= Área de la cuenca
COTAS			
Cota mínima	Z		
Cota máxima	Z		
Desnivel	msnm		
ALTITUD			
Altitud media			
PENDIENTE			
Pendiente promedio de la cuenca			
DE LA RED HÍDRICA			
Longitud del curso principal	Cm		
Orden de la red hídrica	N		
Longitud de la red hídrica	Ct		
Pendiente Promedio de la Red Hídrica			
PARAMETTROS GENERADOS			
Tiempo de concentración	tc	$13.548 * \left(\frac{L^2}{H}\right)^{0.77}$	L=Longitud del cauce principal H= Diferencia de alturas
Pendiente del cauce principal	S	$S = \frac{H}{L}$	H= Diferencia de alturas L= Longitud del cauce
Densidad de Drenaje	Dd	$Dd = \frac{L}{A}$	L= longitud de las corrientes A= Área de la cuenca

Fuente: Gravelius (1914), Hortón (1945), Fuentes Junco (2004), Delgadillo y Páez (2008).

4.2.2. Litología

Las características de los suelos y los tipos de rocas tienen un papel preponderante en el comportamiento de las laderas (Mora, et al., 1992; Cuanalo, et al., 2011). El grado de alteración de las rocas, su compactación, la cementación de las partículas, su composición mineralógica, la capacidad de retención de humedad, el estado de fracturamiento, el ángulo de buzamiento, etc., condicionan claramente los movimientos de las laderas (Mora et al., 1992; Martínez y Balaguer 1998; Cuanalo et al., 2011).

Se elaboró el mapa de litología a partir de los archivos digitales (PDF) obtenidos del servicio Geológico Mexicano (SGM), mismo que se digitalizó a mano alzada en el software Arc Gis 9.3. Se reconocieron 18 unidades litológicas que caracterizan principalmente la zona: 1) Lutita arenisca (Triásico superior); 2) Lutita arenisca (Jurásico Inferior); 3) Lutita Arenisca (Jurásico medio); 4) Caliza Lutita y Lutita Caliza (Jurásico Superior); 5) Caliza y Caliza Lutita (Cretácico inferior); 6) Caliza Lutita, Lutita Caliza (Cretácico Superior); 7) Arenisca Limolita, Arenisca Lutita, Lutita Arenisca y Arenisca Lutita (Paleógeno); 8) Basalto, Toba Riolítica, Toba Dacítica, Conglomerado Polimítico, Arenisca (Terciario); 9) Aluvión (Cuaternario).

Las 18 unidades litológicas fueron reclasificadas y categorizadas en 5 clases de acuerdo a la compactación y estructura del material (Tabla 4.4). Para generar el peso para cada unidad litológica, se consideró lo reportado por Lugo-Hubp et al. (2005), y Cuanalo et al. (2006).

Tabla 4.4 Clasificación de la litología y valor asignado.

Unidades	Características litológicas y estructurales	Grado de susceptibilidad	Valor
Material aluvial	Conglomerado del Neógeno y aluvión del Cuaternario. Unidad que se presenta en la terrazas aluviales hacia las zonas más bajas de los valles. Muy pocas fallas y fracturas.	Muy bajo	1
Basaltos	Basaltos del Neógeno, roca sana.	Bajo	2

Rocas sedimentarias del Paleógeno	Areniscas-lutitas y Areniscas-limolitas del Paleógeno. Se presenta en las partes bajas de la subcuenca.	Medio	3
Tobas volcánicas del Neógeno	Toba riolítica y toba dacítica: tiene una distribución diversa en sentido horizontal y vertical, con grosor de unos pocos metros a cientos de metros, cubren parcialmente las rocas sedimentarias mesozoicas (Lugo Hubp et al., 2005). Otra unidad presente es el depósito de flujo piroclástico proveniente de la caldera de Acoculco, se caracteriza por ser un material poco consolidado.	alto	4
Rocas del Jurásico Superior, Cretácico y Triásico	Caliza, caliza lutita, lutita caliza, lutita arenisca: se presentan en estratos delgados a gruesos (Lugo Hubp et al., 2005); incluyen fallas, fracturas e inclinación de estratos (Cuanalo, et al., 2006). Es normal observarlas en laderas muy altas y pendiente superior a los 20° (Lugo Hubp et al., 2005), y también es común encontrar contactos entre estratos de diferente competencia por los cuales se infiltra el agua (Lugo Hubp et al., 2005).	Muy alto	5

4.2.3. Mapa de pendientes

Existe una relación muy estrecha entre el movimiento de terreno y la pendiente. Si el ángulo de la pendiente incrementa también aumenta la tensión en el suelo o del material poco compactado. La pendiente en un punto del terreno puede definirse como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical (García Rodríguez, 2008; Cardozo, 2013).

Con el mapa de pendientes se describen las condiciones topográficas del terreno, los procesos característicos y esperados de acuerdo al grado de inclinación del terreno (Zuidam, 1986).

Se generó el mapa de pendientes de la subcuenca San Marcos a partir de los valores de altura obtenidos en el Modelo Digital de Elevación, mediante el software Arc gis 9.3 con la función de slope, el cual, automatiza la máxima tasa de cambio en Z entre cada celda y sus vecinas. El resultado obtenido es un raster

expresado en grados. Posteriormente, se reclasificó el mapa en 5 categorías según las geoformas que representan y finalmente se le asignó valores relativos de acuerdo a la susceptibilidad por PRM, tales valores van desde 1, para una susceptibilidad baja, hasta el valor máximo de 5, para una susceptibilidad alta. La clasificación fue realizada según la tabla presentada por Zuidam (1986) tomado de Mora et al. (2002) y modificado para la zona de estudio (Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Clases de pendientes, condiciones del terreno, colores sugeridos y valoración del parámetro. Clasificación de acuerdo a Zuidam (1986) tomado de Mora, et al., (2002).

Pendiente en (°)	Condiciones del terreno	Valor
<10	Pendiente muy baja, peligro de erosión	1
10-20	Pendiente baja, peligro severo de erosión	2
20-40	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales y peligro de erosión severo	3
40-60	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro de erosión extremo de suelos.	4
>60	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, caída de rocas, cobertura vegetal limitada.	5

4.2.4. Mapas de precipitación anual (1998-1999)

Cuando el terreno se humedece al máximo (saturación), el suelo obtiene un peso adicional al suyo, debido a la carga de agua, el cual puede producir la disminución de la resistencia del suelo e incluso causar que éste se comporte como un fluido (CENAPRED, 2002), de allí que se considera que la humedad del suelo juega un papel importante en la inestabilidad de laderas.

El objetivo de analizar la precipitación acumulada de un año antes y después, es para ubicar los sitios que comúnmente presentan mayores índices de lluvias y así obtener una proximidad de las zonas con mayor saturación de agua

considerando que la humedad es producida por la precipitación previa y consecutiva (CENAPRED 2002; Aristizábal et al., 2010).

Se elaboraron dos mapas de precipitación anual de los años 1998 y 1999, para ello se tomaron los registros pluviométricos diarios, fueron 23 estaciones meteorológicas consultadas para cada año (Tablas 4.6 y 4.7). Seguido a esto se obtuvo el acumulado anual para cada estación con el objetivo de formar una base de datos puntuales con sus respectivas coordenadas, que posteriormente serían transformados a un mapa de precipitación anual, mediante una interpolación por método Kriging. Este método interpola los datos de una muestra dándole mayor peso a los valores que se ubican más cerca y menos a los lejanos. Por lo que se considera que el peso de cada muestra es recíprocamente proporcional a la distancia desde el punto que se está tomando la muestra.

Para el año 1998 los valores de precipitación fueron de 1000-3200 mm anuales, mientras que para el año 1999 fueron de 800-3600 mm anuales. Para una mejor interpretación se establece un “valor relativo” acorde a la metodología de Mora y Vahrson (1994), se le asigna valores mayores a aquellas áreas con mayor porcentaje de precipitación anual.

Tabla 4.6 Clasificación de la precipitación del año 1998.

Precipitación anual (mm) año	Descripción	Valor del factor
1000-1200	Muy bajo	1
1200-1600	Bajo	2
1600-2000	Medio	3
2000-2600	Alto	4
2600-3200	Muy alto	5

Tabla 4.7 Clasificación de la precipitación del año 1999.

Precipitación anual (mm) año1999	Descripción	Valor del factor
800-1200	Muy bajo	1
1200-1800	bajo	2
1800-2400	medio	3
2400-3000	alto	4
3000-3600	Muy alto	5

4.2.5. Mapa de precipitación máxima mensual-Octubre 1999

Se incorpora la influencia de las lluvias intensas como factor desencadenante de los procesos de remoción en masa utilizando la información de precipitación pluvial mensual acumulada de estaciones climatológicas de la zona de estudio.

Mora y Vahrson (1992) consideran que los movimientos de terreno que involucran materiales orgánicos o materiales no consolidados son generados regularmente por precipitaciones de corta duración pero de gran intensidad. Basándose en esa idea, se pueden emplear los datos de precipitación máximas históricas anuales o mensuales para localizar las zonas más lluviosas y por lo tanto más susceptibles a deslizarse a causa de este fenómeno meteorológico.

Para la zona de estudio, las precipitaciones máximas e intensas ocurrieron en el año 1999 en los días 4 y 5 de octubre, generadas por varios sistemas atmosféricos, principalmente por la depresión tropical número 11 y el frente frío número 5, fenómeno que afectó la población de la Sierra Norte de Puebla generando diversas consecuencias, como desbordamientos de ríos y un alto porcentaje de procesos de remoción en masas. Mismos que provocaron pérdida de vidas humanas y daños en la infraestructura. Este suceso fue un desastre natural que incluyó vida humanas y daños económicos (Lugo-Hubp, et al. 2005; Bitrán. B, 2001; Alcántara-Ayala, 2004).

Se elaboró el mapa de precipitación máxima mensual correspondiente al mes de octubre del año 1999, para las 23 estaciones meteorológicas consultadas se determinó el acumulado mensual para cada una de ellas y al igual que en la técnica anterior, se formó una base de datos puntuales con sus respectivas

coordenadas, que posteriormente fueron transformados a un mapa de precipitación mensual, mediante una interpolación por método Kriging.

Tabla 4.8 Clasificación de las lluvias máximas mensuales, mes de octubre del año 1999

Precipitación máxima mensual	Descripción	Valor del factor
200-300	Muy bajo	1
300-450	Bajo	2
450-600	Medio	3
600-750	Alto	4
750-850	Muy alto	5

Los valores de precipitación obtenida fueron de 200-850 mm. Para una mejor interpretación se establece un “valor relativo” acorde a la metodología de Mora y Vahrson (1994), y se le asigna valores mayores a aquellas áreas con mayor porcentaje de precipitación mensual (Tabla 4.8).

4.2.6. Mapa hipsométrico

El mapa hipsométrico es un mapa físico geomorfológico que muestra la disposición de las curvas de nivel en el terreno y denotan a detalle la configuración de la morfología (García Becerra et al., 2002).

La influencia de las altitudes es notable en la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa, puesto que casi siempre se originan éstos, en cúspides o escarpes de ladera (García Rodríguez, 2008). Es importante contar con un modelo que represente las elevaciones de cada punto de la superficie y permita conocer las cotas mínimas y máximas de la orografía de la zona de interés. Cabe mencionar que este parámetro no es el más empleado, pero sí de uso común en trabajos en zonas montañosas con fuertes desniveles, (Fernández, 2001), como es el caso de esta zona de estudio.

El mapa hipsométrico consistió básicamente en una reclasificación del MDE, con la opción Reclasify desarrollado por el programa Arc GIS 9.3 (ESRI), posteriormente se plasmó una gama de colores, la cual crea una visión del terreno sobrepuesto.

En la zona de estudio existe un alto gradiente topográfico >2800 msnm, es por ello que la clasificación por intervalos del MDE se ha realizado de 600 en 600 metros. A excepción del primer intervalo que comienza a partir de la altura inferior de la subcuenca 12 a 600 m, y el último que abarca desde 2400 m hasta la altura máxima de la zona de estudio (tabla 4.9).

Tabla 4.9 Clasificación de las alturas y el nivel de susceptibilidad por procesos de remoción de masa.

Altitud	Descripción	Valor del factor
12-600	Muy bajo	1
600-1200	Bajo	2
1200-1800	Medio	3
1800-2400	Alto	4
2400-2882	Muy alto	5

4.2.7. Procesado de imágenes Satelitales

Corrección atmosférica

Una imagen satelital puede resultar afectada por interferencias que hacen que la información que quiere obtenerse aparezca perturbada por una serie de errores (Lamolda Ordóñez, 2008; Geomática, 2013). La corrección atmosférica tiene como su principal objetivo reducir o eliminar las distorsiones que la atmosfera introduce en los valores de radiancia que llegan al sensor desde la tierra, así mismo al eliminar el efecto atmosférico, se logra recuperar los parámetros físicos de la superficie terrestre incluyendo la reflectancia de la superficie, la visibilidad del suelo y la temperatura (García López et al., 2001; Brizuela et al., 2007; Geomática, 2013).

Para este trabajo se ha utilizado el método de corrección atmosférica FLAASH (Fast Line –of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) desarrollado por el Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate (AFRL/VS), Hanscom AFB and Spectral Sciences, Inc. (SSI), el cual está basado en el modelo de transferencia radiativa MODTRAN 4 (MODerate Resolution TRANsmittance). El método FLAASH cumple con las siguientes funciones: Eliminar de la radiancia

recibida por el sensor los efectos de la absorción y dispersión originados por las moléculas y partículas atmosféricas en suspensión y como segundo objetivo es, convertir esa radiancia a valores de reflectividad de superficie.

Muchos de los parámetros especificados para el proceso de la corrección atmosférica, fueron tomados de los metadatos de la imagen Landsat, tales como, fecha, hora de adquisición, L mínimo, L máximo, elevación solar y el método de cálculo y datos complementarios fueron tomados de Chander y colaboradores (2009).

1) Cálculo de la Radiancia

$$L_{\lambda} = \text{Grescale} * (Q_{cal} + B_{rescale})$$

Donde:

$$L_{\lambda} = \text{Radiancia espectral en} = \frac{w}{m^2 * sr * \mu m}$$

Q_{cal} = Valor del pixel en número digital

$$G_{rescale} = (L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda}) / (Q_{cal\ max})$$

$$B_{rescale} = L_{MIN\lambda}$$

$L_{MIN\lambda}$ = Valor de radiancia escalado con respecto al valor mínimo de numero digital (0) en $W/m^2 * sr * \mu m$.

$L_{MAX\lambda}$ = Valor de radiancia escalado con respecto al valor máximo de numero digital (255) en $W/m^2 * sr * \mu m$.

$Q_{cal\ max}$ = Máximo valor de numero digital (ND=0).

$Q_{cal\ min}$ = Mínimo valor de numero digital (ND=0).

2) Cálculo de la reflectancia

$$\rho_p = (\pi * L_{\lambda} * d^2) / ESUN_{\lambda} * \cos \theta_s$$

Donde:

ρ_p = Reflectancia planetaria sin unidades.

L_λ = Radiancia espectral.

D = distancia tierra sol en unidades astronómicas.

$ESUN_\lambda$ = Medida de la irradiancia solar exoatmosferica.

θ_s = Angulo del cenit solar en grados.

4.2.8. Mapa de usos de suelo y vegetación

Algunas coberturas vegetales, particularmente la vegetación densa y con raíces fuertes, proporcionan efectos mecánicos e hidrológicos que favorecen la estabilidad de las laderas (CENAPRED, 2002; García Rodríguez, 2008). Se ha comprobado que los procesos de remoción en masa, son iniciados en áreas con escasa vegetación, suelos desnudos o deforestación (Martínez Gallego y Balaguer Carmona, 1998; García Rodríguez, 2008).

Para elaborar el mapa de uso de suelo y vegetación, se emplearon las técnicas de clasificación de imágenes, Según Vicens (2009), dichas técnicas facilitan la transformación de imágenes crudas (fotografías aéreas, imágenes de satélite, etc.) en datos temáticos o cartografías y que exponen la información con un significado evidente. Los procesos de clasificación supervisada y no supervisada son los más usados y conocidos. La primera de ellas parte de un cierto conocimiento previo del terreno, a través de una combinación de trabajo de campo, análisis de fotografías aéreas, mapas e informes técnicos, literatura científica y local (Ramírez Daza, 2013; Chuvieco, 1990). De acuerdo a este conocimiento acerca del área de interés, es posible delimitar sobre la imagen las áreas de entrenamiento o piloto (*training areas*). Las características espectrales de estas áreas son utilizadas para entrenar un algoritmo de clasificación, el cual calcula los parámetros estadísticos de cada banda para cada sitio piloto, para luego evaluar cada ND de la imagen, compararlo y asignarlo a una respectiva clase. (Chuvieco, 1990; Pérez et al., 2005; Ramírez Daza, 2013). Y la segunda contempla los procedimientos de agrupación de los píxeles de una imagen según su similitud espectral, sin conocimiento previo del contexto temático (Ramírez Daza, 2013).

Para realizar la clasificación supervisada de la zona de estudio, se emplearon imágenes Landsat del sensor TM5, del path y row (26/46 - 25/46), los datos fueron corregidos atmosféricamente y se obtuvieron las reflectancias mediante el módulo FLAASH de ENVI 4.3. Seguido a esto se realizó la clasificación supervisada, siguiendo la metodología de Gómez Ceballos y Calderón Robles (2012) y Cardozo (2013).

En primer lugar se definieron los elementos a clasificar (tipos de vegetación, casco urbano, cuerpos de agua, suelo desnudo, cultivos). La identificación de cada elemento se basó en la interpretación de distintas composiciones de color (falso color) de la imagen Landsat TM5. Cabe destacar que se usó la banda 3 (región visible) y la banda 4 del infrarrojo cercano para las diferentes composiciones de color, la cual permite distinguir zonas con cobertura vegetal, suelos desnudos, cuerpos de agua, áreas urbanas, cultivos. Así, las composiciones usadas fueron: RGB: (4-3-1); (3, 4,5); (3-2-1); (4-3-2); (4, 5,3 y (1-2-3).

Esto permitió definir regiones de interés (ROIs, del inglés “Regions of Interest”) para cada cobertura, posteriormente se evaluó la separabilidad espectral de las mismas. Dichos ROIs, fueron empleados luego como sitios de entrenamiento para una clasificación supervisada con el algoritmo de máxima probabilidad. Finalmente se hizo el análisis e interpretación del resultado obtenido. El proceso se vio facilitado por el tratamiento de información dada por el algoritmo de clasificación disponible en los paquetes de softwares comerciales para el procesamiento de imágenes satelitales (en este caso ENVI 4.3).

4.2.9. Identificación, mapeo y elaboración de cartografías de los procesos de remoción en masa (PRM)

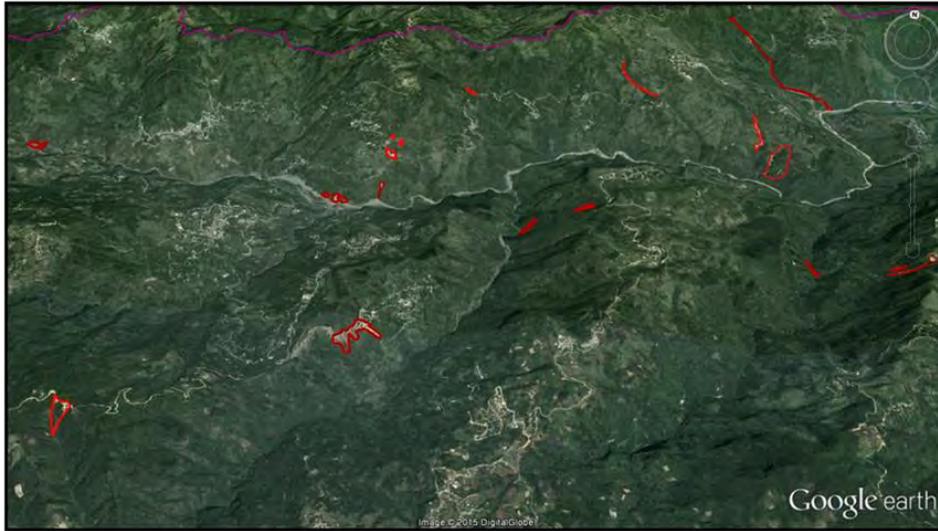


Figura 4.1 Identificación de los procesos de remoción en masa, sobre las imágenes de la página de Google Earth de fecha (7-3-2012).

La presencia previa de los movimientos de terreno es otro factor a considerar como un indicador de la ocurrencia futura de tales procesos. Por lo tanto, se entiende que, futuros procesos ocurrirán bajo las mismas condiciones geológicas y geomorfológicas que condujeron a los movimientos de laderas pasadas y recientes. En este sentido, la presencia de los procesos de remoción en masa pasados y recientes, en conjunto con la identificación y la representación de los factores condicionantes, son claves importantes en la predicción de futuros movimientos de terreno (Carrara, et al., 1998; Cardozo, 2013).

Es importante destacar que no existe un inventario ni cartografía previa de movimientos de terreno para la subcuenca San Marcos. Para tal caso, se han elaborado dos cartografías y dos inventarios de los procesos de remoción en masa mediante los datos recopilados de reportes técnicos, periodísticos y de las imágenes y fotografías de la plataforma Google Earth.

Para la elaboración de la primera cartografía, se consultaron notas periodísticas y reportes técnicos, en ellas se encontraron algunos registros de los años 2007-2014. Posteriormente con los registros obtenidos de los documentos mencionados

previamente se identificó sobre la imagen de la página de Google Earth de fecha (7-3-2012) algunos deslizamientos (figura 4.1), dichos deslizamientos fueron digitalizados como polígonos y consecutivamente fueron transformados de formato “kml” (Keyhole Markup Language) a formato “shape” mediante el software Arc GIS 9.3, con la misma proyección y sistema de referencia usado en las imágenes digitales con el objetivo de obtener un ajuste espacial entre datos. Cabe mencionar que analizando visualmente las imágenes también fue posible identificar varios de los movimientos de terreno que no fueron reportados. Una vez identificados y digitalizados los movimientos de masas se procedió a realizar una tabla de inventario, en ella se indicó las coordenadas, zona y descripción de tales movimientos.

La segunda cartografía e inventario de deslizamientos se realizaron en base a las fotografías obtenidas en la página de Google Earth e información de notas periodísticas, en ella se muestra con fotografías los sitios con mayor afectación a procesos de remoción en masa, (las cartografías e inventarios se muestran en el capítulo 5).

4.2.10. Selección del modelo para la zonificación de susceptibilidad por PRM en la subcuenca del río San Marcos

La identificación de los sitios propensos a deslizarse y la zonificación, son una de las primeras fases más importantes en la prevención y mitigación en la gestión de riesgo (Suárez et al., 2009; Castillo Barrantes et al., 2011). Actualmente existen múltiples métodos para determinar la susceptibilidad de los procesos de remoción en masa, tal como se describieron en el capítulo II y la elección de ella depende de las necesidades y el alcance del investigador. El método heurístico desarrollado por Mora y Vahrson (1994) ha sido uno de los modelos más empleados por varios autores: (Barredo et al., 2000; Mora Chinchilla, 2004; Salazar Mondragón, 2007; Bathrellos et al., 2009; Suárez et al., 2009, Ochoa y Lagos, 2010; Segura et al., 2011; Barrantes Castillo et al., 2012, Villacorta et al., 2012, Rodríguez Solano et al., 2013, Chaves Salas et al., 2014, Reyes Chaves y

Fernández Arce, 2014), debido que es un método relativamente rápido y resulta sencillo aplicarlo (Barrantes Castillo, 2012).

La elección del modelo resulta ser una tarea difícil ya que siempre se busca una técnica que permita obtener los resultados más cercanos a la realidad. Para la selección del método a utilizar se tuvo en cuenta lo siguiente: 1) búsqueda de los antecedentes de los modelos existentes ¿En dónde se han aplicado? y los resultados obtenidos; 2) obtención de la información de la zona de estudio (condiciones geomorfológicas y climatológicas); 3) la extensión del área de estudio; y 4) los datos disponibles.

La literatura señala que el modelo de Mora y Vahrson resulta exitoso en áreas con geomorfología montañosa, relieve escarpado, clima lluvioso, sismotectónicamente activo y en superficies muy extensas (Mora, Vahrson y Mora, 1992; Barrantes Castillo 2011; Segura, 2011), como es el caso de la zona de interés y de los países de Centroamérica en donde ha sido ampliamente aplicado llegando a alcanzar resultados satisfactorios (Mora Chinchilla, 2002, 2004; Barrantes Castillo 2011; Segura, 2011; Reyes et al., 2013; Reyes Chaves y Fernández Arce, 2014; Chaves Salas et al., 2014).

El método heurístico de Mora y Vahrson tienen grandes ventajas, es otra de las razones que motivaron a emplear dicho modelo: en primera, es el único método que trabaja con áreas muy extensas, los parámetros que maneja pueden determinarse de manera económica mediante trabajo de gabinete, es un modelo que brinda la facilidad de incluir o excluir variables según el área en estudio, es decir, se puede ajustar de acuerdo a la necesidad. Sin embargo, es un modelo que también cuenta con algunas deficiencias: su mayor problema es que la asignación exacta de pesos a los diversos parámetros se basa en ocasiones en el insuficiente conocimiento de campo de los factores decisivos (Gómez et al, 2003; Barrantes Catillo et al., 2011; Segura et al., 2011).

4.2.11. Aplicación del modelo heurístico de Mora y Vahrson (1994) modificado por Mora y colaboradores (2002)

Nuestra propuesta para determinar la susceptibilidad a procesos de remoción en masa dentro de la zona de estudio, se basa en la aplicación del modelo heurístico de Mora y Vahrson (1994), modificado por Mora et al., (2002) y posteriormente para la subcuenca San Marcos incluyendo otros parámetros (hipsometría, vegetación y usos de suelo y precipitación anual). Este método heurístico, se basa específicamente en la combinación cualitativa de mapas de los factores condicionantes y desencadenantes, tales procesos se realizan en una plataforma de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Mora et al., 1992; Segura et al., 2011, Barrantes Castillo et al., 2011).

Evaluación de los factores

Cada una de las variables calificadas en nuestra propuesta, se le asigna valores relativos, de acuerdo con su grado de influencia en la susceptibilidad de procesos de remoción en masa, los valores de los parámetros van desde 1, para una susceptibilidad baja, hasta el valor máximo de 6, para una susceptibilidad alta.

El grado de susceptibilidad al deslizamiento obedece al producto matricial de los parámetros detonantes con el de disparo, utilizando la herramienta “raster calculator” de Arc GIS 9.3. Es así como se considera que el grado de amenaza al deslizamiento es el producto de los elementos pasivos y la acción de los factores de disparo (Mora y Vahrson, 1994; Mora et al., 2002).

De acuerdo con las fórmulas siguientes de Mora y Vahrson (1994) y Mora et al. (2002), modificada para la zona de estudio, se determinó los niveles de susceptibilidad a procesos de remoción en masa en la subcuenca San Marcos.

$$H= EP*D \quad (1)$$

Donde:

H: grado de susceptibilidad al deslizamiento

EP: Valor producto de la combinación de los elementos pasivos (condicionantes) y

D: Valor del factor del disparo (desencadenantes)

El valor de los elementos pasivos se compone de los siguientes parámetros.

$$EP = S_l * S_{p.a} * S_p * S_{v.u.s} * S_h \quad (2)$$

Donde:

S_l : Valor del parámetro de susceptibilidad litológica.

$S_{p.a}$: Valor del parámetro de la precipitación anual.

S_p : Valor del parámetro de la pendiente.

$S_{v.u.s}$: Valor del parámetro de vegetación y usos del suelo.

P_h : Valor del parámetro hipsométrico

El factor de disparo se compone del siguiente parámetro.

$$D_{l.m.m} \quad (3)$$

$D_{l.m.m}$: Lluvias máximas mensuales.

Sustituyendo los parámetros apropiados, la ecuación original se puede expresar como:

$$H = (S_l * S_{p.a} * S_p * S_{v.u.s} * S_h) * (D_{l.m.m}) \quad (4)$$

Se obtuvo el mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa, que luego fue categorizado en 5 tipos posibles de susceptibilidad: muy bajo, bajo, moderado, alto y muy alto.

4.2.12. Validación del modelo

En los modelos de susceptibilidad es recomendable realizar la validación de los resultados. Si esto no se lleva a cabo, el modelo resulta improductivo y tiene poco significado científico. Dado que no se sabe exactamente donde ocurrirán los futuros deslizamientos, lo mejor que se puede hacer es comparar usando al menos los movimientos de terreno del pasado (Chung y Fabbri, 2003).

Para la validación del modelo, se elaboraron 4 cartografías mediante información técnica, periodística, fotografías e imágenes de la página de Google Earth de fechas (7-3-2012 y 19-1-2014), dichos mapas exponen la geomorfología y las condiciones del terreno de la zona de estudio. Las primeras de ellas muestran las áreas críticas de la subcuenca y las restantes muestran las zonas estables, (las cartografías se muestran en el capítulo V).

CAPÍTULO V. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

En este apartado se describen y se interpretan los datos obtenidos para evaluar la susceptibilidad a procesos de remoción en masa dentro de la subcuenca San

Marcos (S.S.M), tales como: índices morfométricos de las subcuencas, los cuales muestran la relación que guardan éstas con los movimientos del terreno. Del mismo modo, se describen los mapas temáticos de los factores condicionantes y del factor desencadenante de los deslizamientos. Finalmente se muestra el mapa de susceptibilidad, la interpretación de éste y la validación de los resultados con las cartografías de los deslizamientos reportados para la zona de estudio.

5.1 Índice morfométrico de la subcuenca San Marcos

A continuación se detallan las características morfológicas más relevantes de la subcuenca San Marcos:

Tabla 5.1. Índices morfométricos de la subcuenca del río San Marcos

Parámetro	Índice	Características	Variabes
Área (km^2)	1634.53	Muy grande	Superficie y forma de la subcuenca
Perímetro (km)	318.95		
Coefficiente de compacidad	2.21	De oval oblonga a rectangular oblonga	
Índice de forma	0.077	Muy alargada y muy poco achatada	
Coefficiente de masividad (km)	0.75	Muy montañosa	Gradiente y relieve de la subcuenca
Cota mínima (msnm)	12	-	
Cota máxima (msnm)	2882	-	
Desnivel (msnm)	2870	Muy alto	
Altitud media (msnm)	1235	-	
Pendiente promedio de la cuenca (%)	10 %	Accidentado	
Pendiente del cauce principal ($^{\circ}$ y %)	19 $^{\circ}$ -35%	Inclinado	
Longitud del curso principal (Km)	145.83	Largo	
Orden de la red hídrica	7	Muy alto	Orden, extensión de la red de drenaje y el tiempo de concentración.
Longitud de la red hídrica	3999.50	-	
Densidad de Drenaje (km/km^2)	2.45	Alto	
Tiempo de concentración (minutos)	63.33	Moderado	

A partir de los parámetros mostrados en la tabla 5.1, se procede a realizar una descripción de cada uno de ellos:

Superficie y forma de la subcuenca

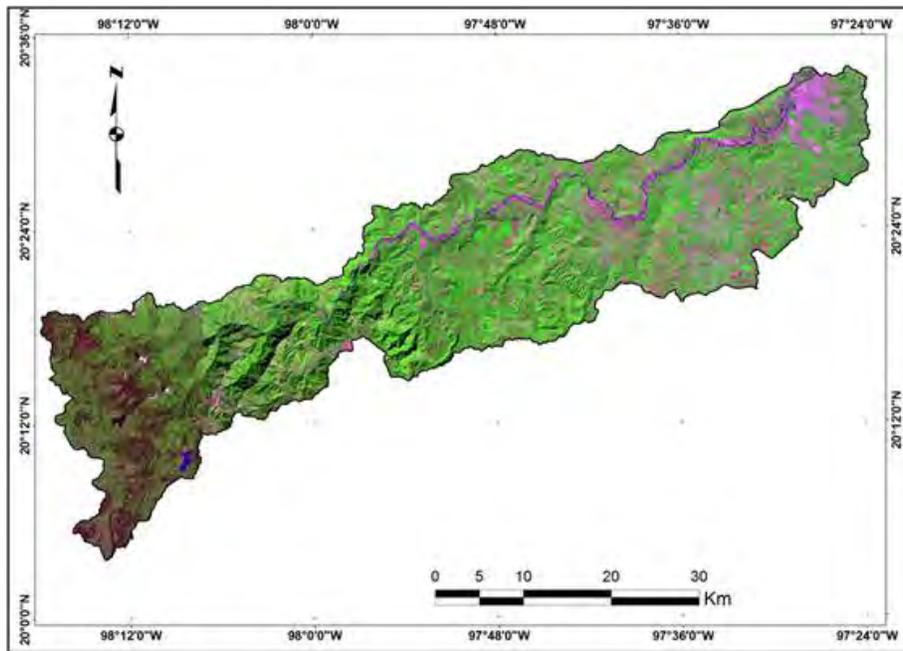


Figura 5.1. Forma de la subcuenca San Marcos, obtenido mediante imágenes Landsat TM 5. Resolución espacial de 30 m.

De acuerdo a los parámetros de superficie y forma de la subcuenca, se puede sugerir que la zona es un sistema hidrogeomorfológico de grandes dimensiones, es decir, la subcuenca San Marcos, de tipo exorreica, tiene una forma muy alargada y poco achatada. Es muy extensa, con un área de 1634.52 km^2 . El tamaño y la forma de la subcuenca, supone mayor tiempo de concentración de la escorrentía superficial, menor susceptibilidad a experimentar crecidas y además posee una alta capacidad para colectar grandes volúmenes de agua.

Gradiente y relieve de la subcuenca

Las alturas dentro de la subcuenca San Marcos están comprendidas desde los 12 msnm (cota mínima) que corresponde el sitio donde desemboca el río San Marcos al mar, hasta 2882 msnm (cota máxima) correspondiente a las zonas más altas de la zona de estudio. Estas grandes diferencias de altitud definen un relieve de

morfología montañosa, con pendientes significativas que favorecen la activación de procesos erosivos y transporte de materiales, del mismo modo, sugieren una variabilidad ecológica y climática, de precipitaciones intensas, sobre todo en verano. Por otro lado, los datos de pendientes reflejan complejidad en la topografía del terreno y en el cauce principal, lo que indica una alta capacidad de arrastre de sedimentos y de erosión del suelo por el rápido desplazamiento del agua.

Orden, extensión de la red de drenaje y tiempo de concentración

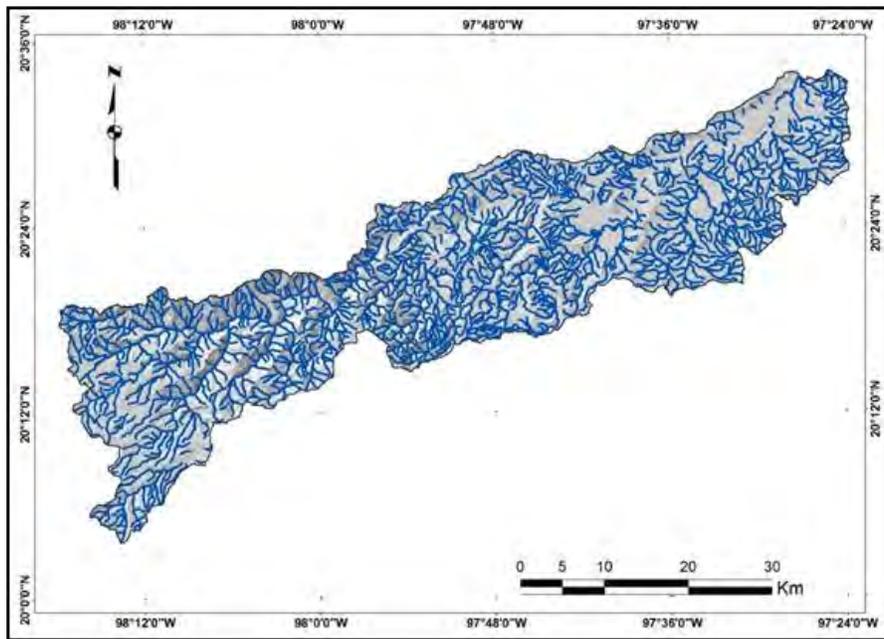


Figura 5.2. Red de drenaje de la subcuenca San Marcos, obtenido mediante un DEM de 30m de resolución.

Los parámetros relativos a la red de drenaje mostraron valores significativos; el orden de la red hídrica es de 7 y la densidad de drenaje de $2.44 \text{ km}/\text{km}^2$, de acuerdo a la clasificación de Junco (2004) corresponde a una cuenca con un nivel alto de ramificación, esto significa, mayor energía, mayor control estructural y el escurrimiento superficial suele ser más rápido. Estas condiciones incrementan la posibilidad de erosionar el suelo y los materiales geológicos, por otro lado, señala que la subcuenca posee suficiente capacidad para evacuar el agua con mayor eficiencia y velocidad de transporte en caso de una tormenta. A raíz de estos

datos y el tiempo de concentración que resultó ser moderado, se concluye que la presencia de una inundación en esta zona es mínima. Sin embargo, existe una alta probabilidad de desarrollo de procesos de remoción en masa, debido a que los altos valores de la densidad de drenaje y de ramificación conducen a una escasez de cobertura vegetal, lo que genera un suelo con mayor potencial de erosión, constituido por materiales geológicos frágiles y poco resistentes (Linsley, 1997; Fuentes Junco, 2004; Fernández y Gonzalo, 2012).

5.2. Índice morfométrico de la subcuenca Tehuantepec y su similitud con la zona de estudio

Como bien se expuso en el capítulo de metodología (capítulo IV), el objetivo de analizar la morfometría de la subcuenca Tehuantepec es para contrastar con la zona de estudio, pensando que las condiciones geomorfológicas de los deslizamientos ocurridos en esta zona hidrológica podrían ser similares a las condiciones que conducirían a la inestabilidad de laderas en el sitio de interés.

Tabla 5.2. Índices morfométricos de la subcuenca del río Tehuantepec.

Parámetro	Índice	Características	Variables
Área (km^2)	1055.94	Muy grande	Superficie y forma de la subcuenca
Perímetro (km)	206.23		
Coefficiente de compacidad	1.78	De oval oblonga a rectangular oblonga	
Índice de forma	0.097	Muy alargada y muy poco achatada	
Coefficiente de masividad (km)	1.66	Muy montañosa	
Cota mínima (msnm)	72		Gradiente y relieve de la subcuenca
Cota máxima (msnm)	3216		
Desnivel (msnm)	3144	Muy alto	
Altitud media (msnm)	1757		
Pendiente promedio de la cuenca (%)	12.9	Fuertemente accidentado	

Pendiente del cauce principal (° y %)	30°-57.74%	Muy inclinado	Orden, extensión de la red de drenaje y el tiempo de concentración.
Longitud del curso principal (Km)	104.42	Muy largo	
Orden de la red hídrica	6	Alto	
Longitud de la red hídrica	2304.35		
Densidad de Drenaje (km/km ²)	2.18	Alto	
Tiempo de concentración (minutos)	35.30	Rápido	

Los datos presentados previamente en la tabla 5.2, señalan que la subcuenca Tehuantepec, de tipo exorreica, tiene un área muy extensa, su forma es muy alargada y poco achata. Los parámetros del gradiente y relieve de la subcuenca, definen una topografía fuertemente accidentada, montañosa con grandes desniveles altitudinales. La densidad de drenaje es abundante, lo cual indica mayor eficiencia y velocidad de transporte de agua.

A continuación se presenta una tabla y una gráfica de comparación de los índices morfométricos de las subcuencas.

Tabla 5.3. Comparación de los índices morfométricos de las subcuencas, las cuales muestran mucha similitud entre ellos. Parámetros caracterizados de acuerdo a los siguientes autores: Gravelius (1914), Hortón (1945), Fuentes Junco (2004), Delgadillo y Páez (2008).

Parámetros	Índice de la Sub. Tehuantepec	Índice de la Sub. San Marcos	Características*
Área	1055.94	1634.52	Muy grande
Índice de forma	0.09	0.07	Muy alargada y muy poco achatada
Coefficiente de masividad	1.66	0.75	Muy montañosa
Cota mínima	72	12	-
Cota máxima	3216	2882	-
Desnivel	3144	2870	Muy alto
Altitud media	1757	1235	-
Pendiente promedio de la cuenca	12.9% -	10%	Fuertemente accidentado y accidentado
Longitud del curso principal	104.42	145.83	Muy largo
Orden de la red hídrica	6	7	Alto
Longitud de la red hídrica	2304.35	3999.50	-
Tiempo de concentración	35.29	63.33	Moderado y rápido
Pendiente del cauce principal	30°-57.74%	19° -35%	Muy inclinado e Inclinado
Densidad de Drenaje	2.18	2.44	Alto

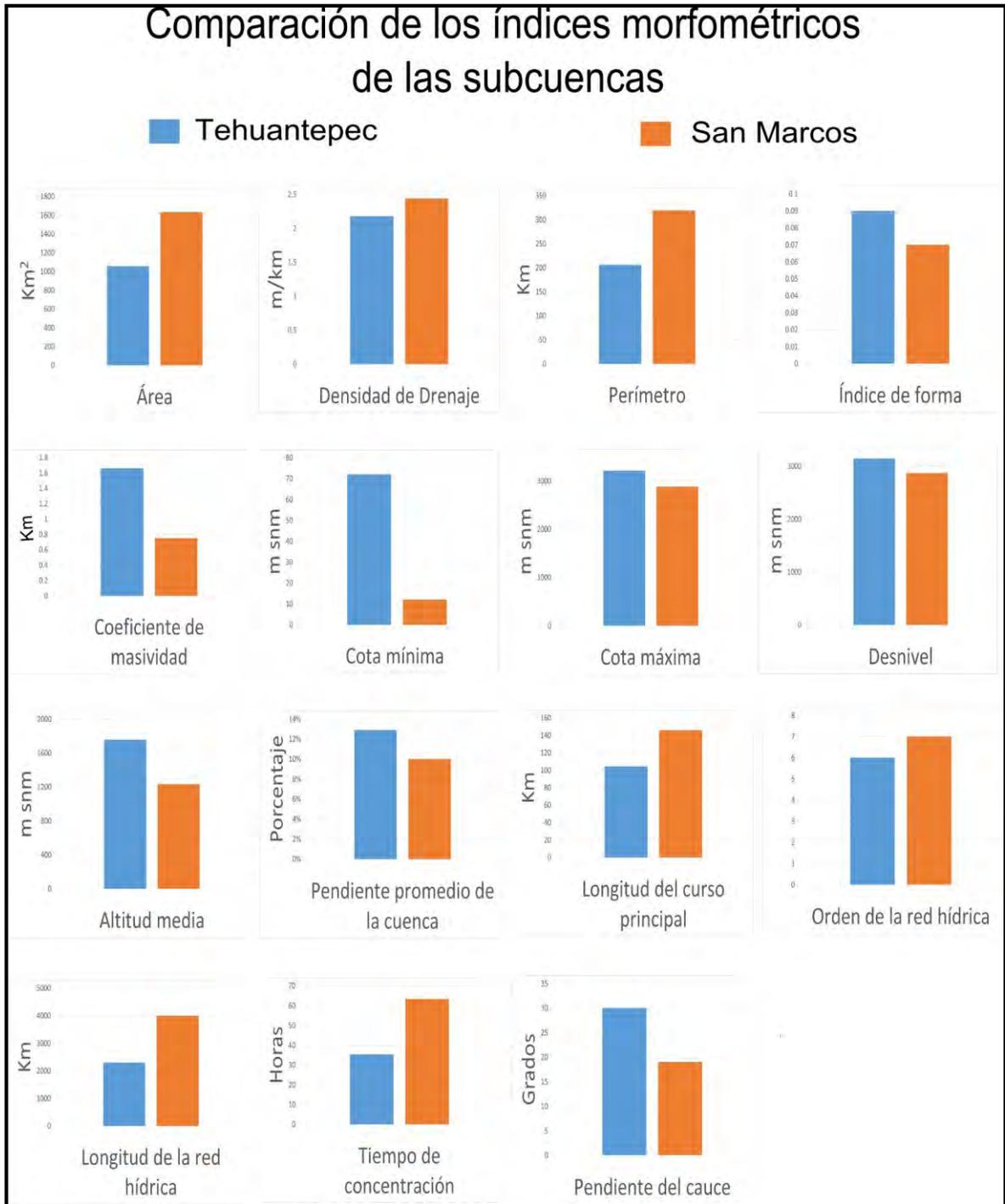


Figura 5.3. Graficas de comparación de los índices morfométricos de la subcuena Tehuantepec y San Marcos.

Se puede observar que los índices morfométricos de las subcuencas presentan grandes similitudes (tabla 5.3 y figura 5.3), ambas zonas hidrológicas contienen

relieve complejo. Se observan mínimas diferencias en el tiempo de concentración, en la pendiente media de la cuenca y en la pendiente del curso principal. Esta analogía entre las subcuencas, señala que existe una alta probabilidad de la presencia de los procesos geológicos de carácter catastrófico en las partes más altas y escarpadas de la zona de estudio, en caso de algún fenómeno extraordinario, por ejemplo, lluvias torrenciales.

5.3. Identificación y mapeo de los Procesos de remoción en masa

La técnica de análisis visual de las imágenes de satélite (en Google Earth), permitió el reconocimiento de 16 movimientos de terreno de los eventos pasados en la subcuenca San Marcos. Además, se reconocieron los principales tipos de movimientos generados en la zona. En este sentido, los movimientos que recorren grandes longitudes en una ladera están asociados a flujos de detritos; los que se extienden hacia los lados corresponden a deslizamientos, por otro lado, también se identificó cortes de laderas (de tipo antropogénico), que esto a largo plazo favorece a movimientos de masas. Los PRM se encuentran distribuidos principalmente en la parte centro-noroeste, que corresponde a la parte serrana de la subcuenca (figura 5.4).

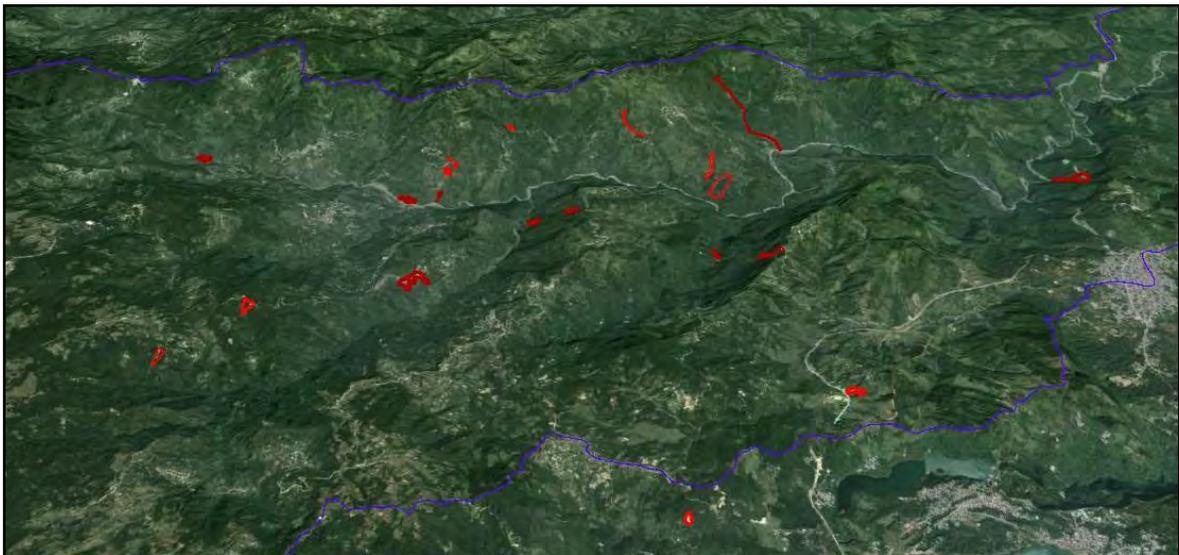


Figura 5.4. Localización de los movimientos de terreno sobre las imágenes de fecha (7-3-2012) trabajadas en Google Earth.

La identificación de los deslizamientos previos en la zona de estudio ayudó en la asignación de los niveles de susceptibilidad a cada uno de los factores condicionantes y desencadenantes. Así, se le asignó el nivel de susceptibilidad alto a los sitios en donde se localizaron la presencia de movimientos de terreno, y las zonas que no fueron afectados por dichos procesos, se le asignó una clase de susceptibilidad baja.

5.4. Análisis de los factores condicionantes y del factor desencadenante

Se realizó el análisis e interpretación de los distintos factores que participan en la ocurrencia de los procesos de remoción en masa dentro de la subcuenca San Marcos. Tales factores condicionantes y desencadenantes fueron analizados a partir de los mapas temáticos generados en este trabajo, los cuales sirvieron como base fundamental en la obtención del mapa de susceptibilidad a movimientos de terreno de la subcuenca. Las variables “cobertura vegetal y uso de suelo”, se descartaron del análisis por la falta de datos espaciales. Sin embargo, es importante aclarar que no se niega el significativo valor del dicho factor condicionante en la susceptibilidad del terreno. Su relevancia y demás aspectos se discuten en el apartado 5.7.2 del presente capítulo.

5.4.1. Pendiente

En la subcuenca San Marcos se han diferenciado 5 tipos de pendientes: muy baja, baja, moderada, fuerte y muy fuerte. Mismas se les asignó valores relativos de acuerdo a la susceptibilidad por PRM, tal como lo sugiere la tabla presentado por Zuidam (1986) tomado de Mora, et al. (2002) y modificado para la zona de estudio.

Las zonas con pendientes muy bajas (< 10°), comprenden superficies planas asociadas a los valles, altiplanicies, terrazas aluviales y a la desembocadura del río San Marcos.

Pendiente baja (10°-20°), se encuentra distribuida en toda la subcuenca, son sectores considerados como estables que requieren medidas correctivas menores, por lo tanto, en estos sitios no se han registrado movimientos de terreno.

Pendiente moderada (20°-40°), abarca zonas poco montañosas con crestas moderadas. Están asociadas a pendientes fuertes y se han manifestado pequeños deslizamientos, algunos autores señalan que zonas que presentan estos rangos de pendiente ya no se consideran sitios aptos para la construcción de infraestructura (Mora, et al., 2002)

Pendiente Fuerte (40°-60°), estas pendientes se ubican en el centro-noroeste de la subcuenca, son áreas montañosas, de geomorfología muy accidentada que condicionan el área a mayor propensión de movimientos gravitacionales de terreno.

Pendiente Muy fuerte (60°-70°), los sitios asociados a esta pendiente están severamente accidentados y muy inclinados. En estas zonas se presentan desprendimientos y caídas gravitacionales de rocas por lo abrupto de las laderas.

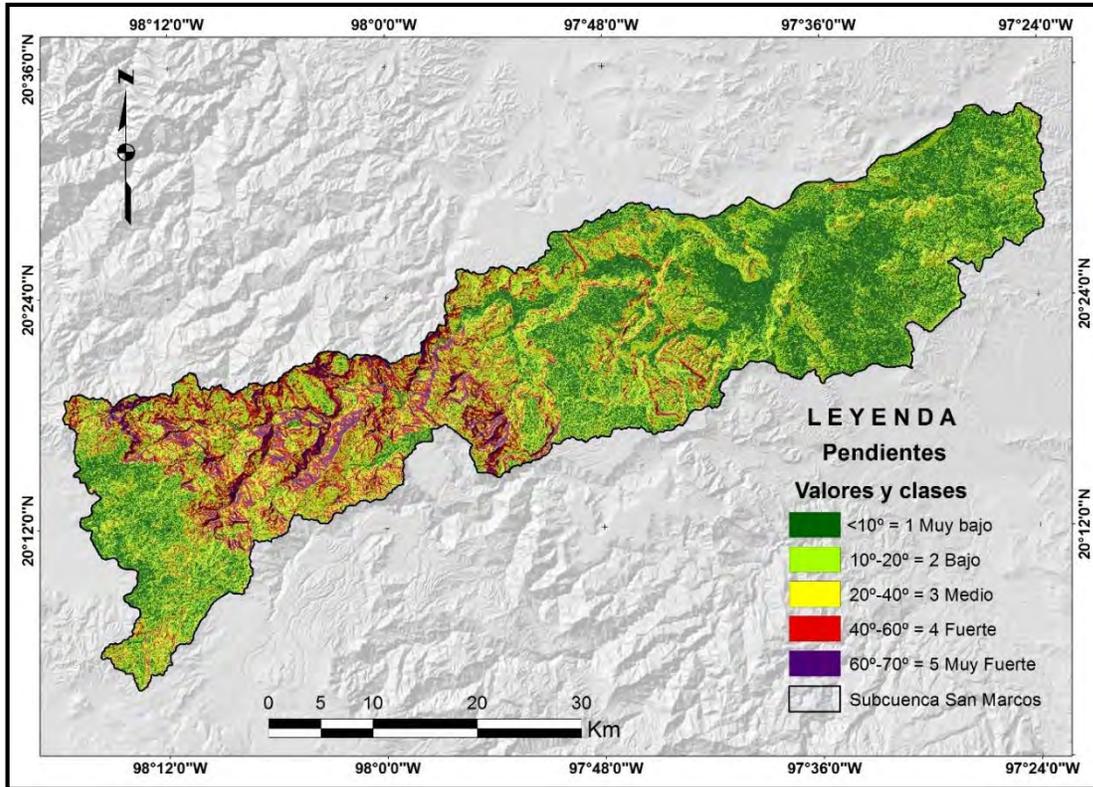


Figura 5.5. Mapa de pendientes, muestra valores y clases de acuerdo a la susceptibilidad por PRM del terreno, se observa que la parte central-noroeste son zonas muy abruptas que corresponden a pendientes $> 20^\circ$ (de medio, fuerte y hasta muy fuerte).

La reclasificación de las pendientes (Figura 5.5), expuso que las áreas propensas a sufrir movimientos de terreno son aquellas con pendientes moderadas a muy fuertes (20° a 70°) considerando que el gradiente de una ladera incrementa la probabilidad de falla (Dai y Lee 2002), además son sectores con alta actividad antrópica, densamente poblada, en los sectores con pendientes $>50^\circ$ se encuentran asentados los municipios de Pahuatlán del Valle, San Pablito, Tlacuilotepec, por mencionar algunos. Debido a la dinámica de este sector y la topografía compleja, dan como resultado la inestabilidad del terreno. Por lo tanto, a estos sectores se les asignó un nivel de susceptibilidad alto y las pendientes $<20^\circ$, asociadas a zonas estables, se les estableció un valor de susceptibilidad bajo. Por otro lado, los deslizamientos previos identificados sobre las imágenes de satélite (figura 5.4), en su mayoría ocurrieron en el centro-noroeste de la subcuenca que corresponde a las partes más inclinadas de la misma (pendientes de $20^\circ-70^\circ$). Mismos resultados obtuvieron Hernández Mena (2008), Segura et al.

(2011), quienes señalaron que efectivamente hay una clara correlación entre las zonas más inclinadas, con pendientes $>20^\circ$, y las zonas afectadas por tales fenómenos.

El modelo digital de elevaciones (MDE) mostró una respuesta aceptable en la obtención de los diferentes niveles de inclinación dentro de la zona de estudio. Es importante mencionar que en diversos trabajos estos productos han proporcionado resultados satisfactorios para obtener los mapas de pendientes, por mencionar algunos: Hernández Mena (2008), realizó un estudio en la Sierra Norte de Puebla, empleó el MDE para obtener el mapa de pendientes, sus valores de pendientes fueron 0° - 61° y determinó que las zonas con pendientes $>20^\circ$ eran las más susceptibles a movimientos de terreno. Hervás et al., (2002), Cardozo (2008), Barrantes Castillo (2011), Segura et al., (2011), son algunos de los autores que han hecho uso del MDE para obtener este parámetro, todos coinciden que las pendientes moderadas a muy fuertes son sitios con altas probabilidades a ser afectadas por los procesos de remoción en masa, por lo tanto, son sitios inestables.

5.4.2 Litología

Uno de los factores que no se debe ignorar en el análisis del peligro por PRM, es el factor litológico que en muchos casos, como en la zona estudiada, puede llegar a ser uno de los detonantes principales en la ocurrencia de tales fenómenos. La geología de la subcuenca San Marcos es muy diversa, está constituida principalmente por rocas marinas y continentales, cubiertas en algunas partes por materiales volcánicos del Terciario y Cuaternario.

La superposición de la litología característica de la subcuenca San Marcos con los movimientos de masa identificados previamente (figura 5.4), expuso que la lutita arenisca (TRs, Ji, Jm), caliza lutita, lutita caliza, caliza (Js, Ki, Ks), presentaron la mayor superficie afectada por procesos de remoción en masa, por ello, a estas unidades se les asignó un nivel muy alto y extremadamente alto de susceptibilidad a PRM. En la literatura Lugo Hubp et al. (2005) y Cuanalo et al. (2006), argumentan que estas rocas tienen baja resistencia al intemperismo y a la

erosión, además incluyen grandes fallas, intenso fracturamiento e inclinación de estratos; comunmente estas rocas se observan en laderas muy altas y pendiente superior a los 20° y es normal encontrar contactos entre estratos de diferente competencia por los cuales se infiltra el agua y esas superficies son, en ocasiones, los planos de desliamiento de los materiales.

Las tobas riolítica y dacítica del Neógeno no presentaron fenómenos de remoción en masa, pero se sabe que son materiales poco consolidados y pueden llegar a fallar en caso de algún fenómeno extraordinario por ejemplo, lluvias torrenciales, considerando todo esto, se les estableció un nivel alto de susceptibilidad.

Las unidades sedimentarias del Paleógeno (Ar-Lm, Lu-Ar, Ar-Lu) son las que predominan el mayor porcentaje en la subcuenca, estos materiales son considerados mecánicamente poco resistentes, sin embargo no se han reportado movimientos de terreno sobre ellas, probablemente cuentan con una buena compactación y cementación. Es importante mencionar que estas unidades se ubican en la planicie de la subcuenca, lo cual ha favorecido que aún permanezcan estables.

También se tiene los basaltos del Terciario, caracterizados por ser unidades resistentes y sanas, es muy difícil que sea perturbado por los movimientos de terreno, para tal caso se le asignó baja susceptibilidad a PRM.

El aluvión, material sedimentario depositado a las márgenes de los cauces y valles, también formando terrazas aluviales, ubicadas en los lugares planos de la subcuenca, se les reconoce como la superficie de cobertura con menor incidencia de movimientos gravitacionales y por lo tanto se estableció un valor muy bajo de susceptibilidad.

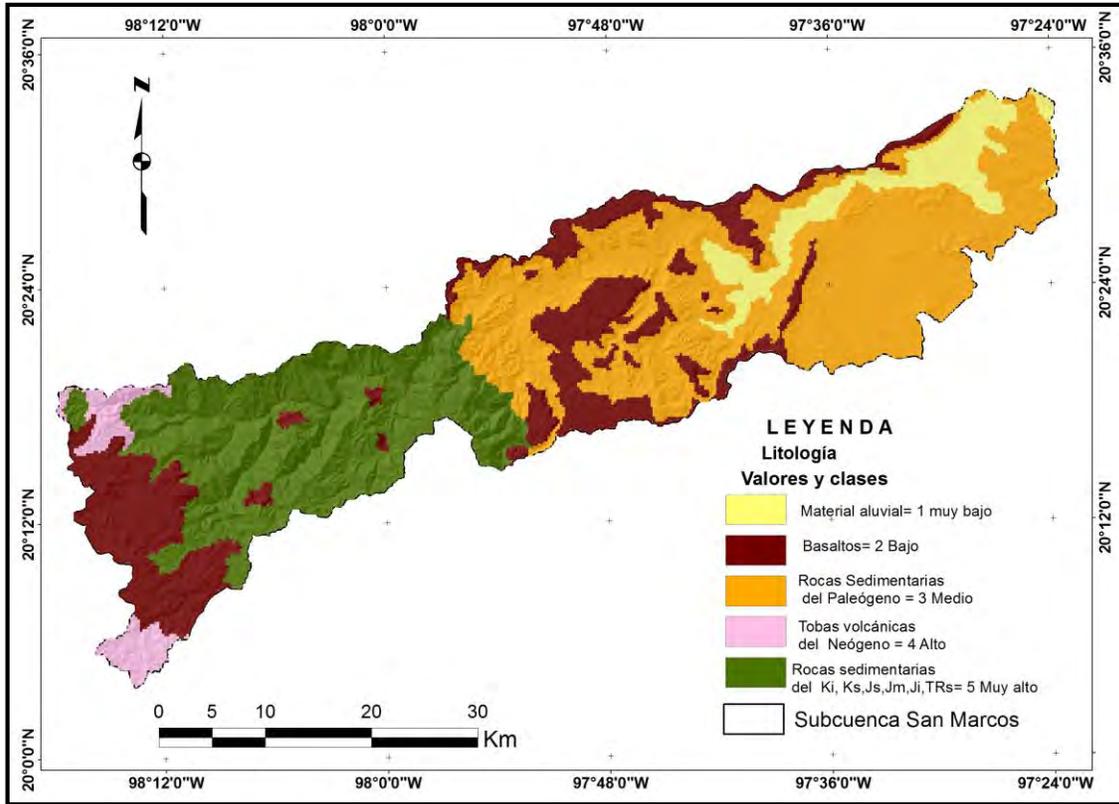


Figura 5.6. Mapa litológico clasificado de acuerdo a diversas características del material. (Jurásico inferior (Ji), Jurásico Medio (Jm), Jurásico superior (Js), Cretácico inferior (Ki), Cretácico superior (Ks), Triásico superior (Ts)).

5.4.3 Precipitación anual de los años 1998-1999

La humedad del suelo es producida por la precipitación previa y consecutiva, la acumulación y la infiltración del agua en éste (CENAPRED, 2002; Aristizábal et al., 2010), los efectos de humedad ambiental (niebla) también es un factor importante que contribuye a la transmisión de la humedad de las plantas a la superficie vía goteo y condensación. El análisis de los datos de precipitación anual presentados en mapas temáticos (figuras 5.7 y 5.8) permitió el reconocimiento de los posibles sitios más húmedos de la subcuenca. Tales mapas de precipitación exponen que la mayor concentración de lluvias tanto para el año 1998 y 1999 se tienen en la parte centro-noroeste de la subcuenca. Este sector corresponde a la porción más serrana de la zona de estudio donde se distingue la transición de alturas. Cabe mencionar que la sierra forma una pared orográfica que obstruye los vientos provenientes del Golfo de México, por lo tanto al chocar los vientos húmedos con

la Sierra y elevarse este deja caer en forma de lluvia gran parte de su humedad, por esta razón se infiere que esta parte de la subcuenca podría ser la que mayor proporción de humedad contiene y por consiguiente la más propensa a inestabilidad gravitacional debido a la acumulación del agua en zonas de alta pendiente.

Las lluvias dentro de la subcuenca San Marcos, son muy intensas. Para el año 1998 se reportaron entre 1000 a 3200 mm; para el año 1999 osciló entre 800 a 3600 mm. La parte centro-noroeste corresponde a la parte serrana de la subcuenca, que así mismo presenta agua en abundancia (lluvias >1600 mm) en comparación con otras zonas. Esta acumulación anómala de humedad satura el suelo e incrementa la susceptibilidad a peligros por movimientos de laderas. Las zonas que se ubican al este y oeste de la subcuenca presentan menor volumen de precipitaciones (<1600 mm), por lo tanto, se consideran como sitios de baja y muy baja susceptibilidad a PRM. Es importante mencionar que los movimientos de terreno antiguos (figura 5.4) se han identificado en la parte serrana de la zona de estudio, entonces puede aseverarse que la intensidad y frecuencia de lluvias dadas en este sitio, son unos de los factores responsables en el incremento de la presencia de los procesos de remoción en masa.

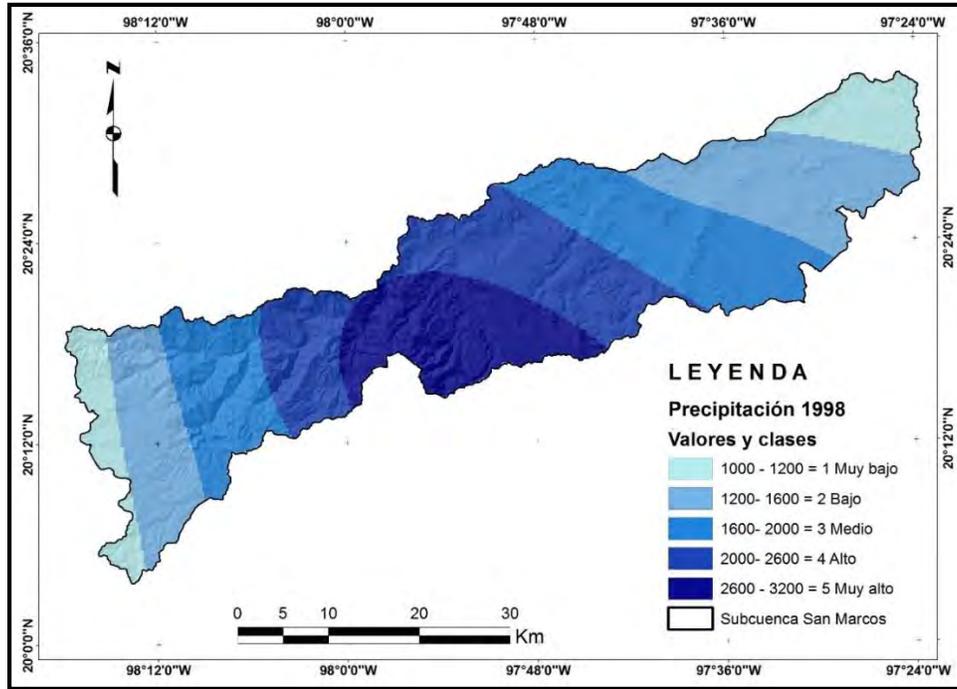


Figura 5.7. Mapa de precipitación anual (1998) con clases y valores, donde se muestra que la mayor concentración de precipitaciones se ubica en la parte centro-noroeste de la subcuenca.

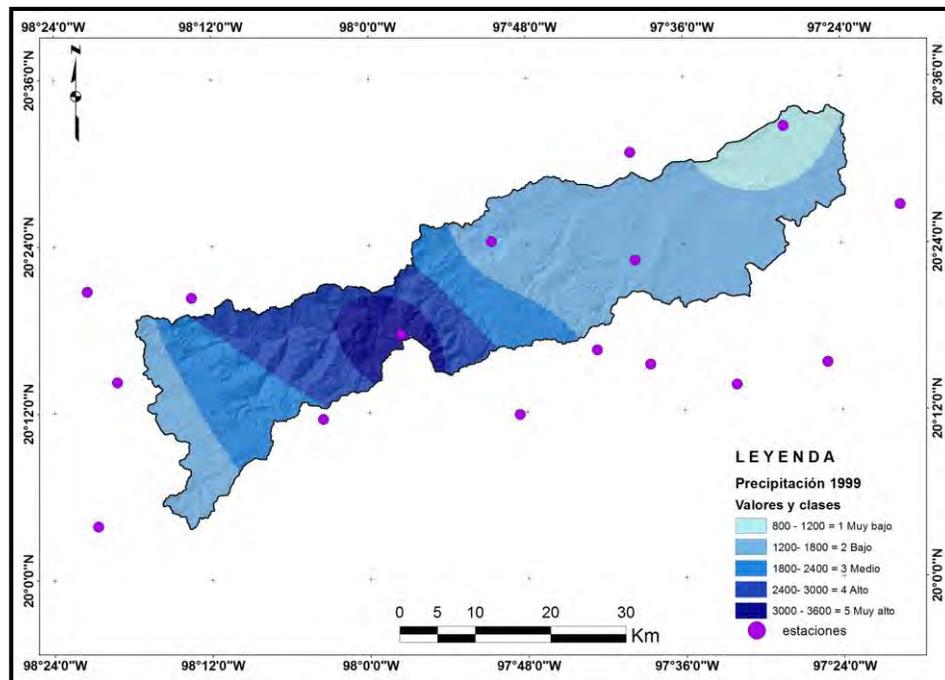


Figura 5.8. Mapa de precipitación anual (1999), donde se muestra que la mayor concentración de precipitaciones se ubica en la parte centro-noroeste de la subcuenca. Los puntos representan las estaciones climatológicas.

5.4 .4 Hipsometría

El mapa de Hipsometría permite discriminar las zonas bajas, medias, altas o las diferencias entre estas, con respecto al nivel medio del mar. En el mapa siguiente (Figura 5.9), se denota a detalle la orografía de la subcuenca San Marcos, en donde: las altitudes de 12-600 msnm, están asociadas a las zonas bajas o planicies que se ubican al noreste de la zona de estudio, incluyen las terrazas aluviales que forman los márgenes del río San Marcos; se tienen lomeríos y premontaña que corresponden a alturas de 600-1200 msnm; los sitios más accidentados, montañosos (cañones) con intensa erosión, están determinados por encima de la cota 1000 msnm, como se observa en el mapa hipsométrico (Figura 5.9).

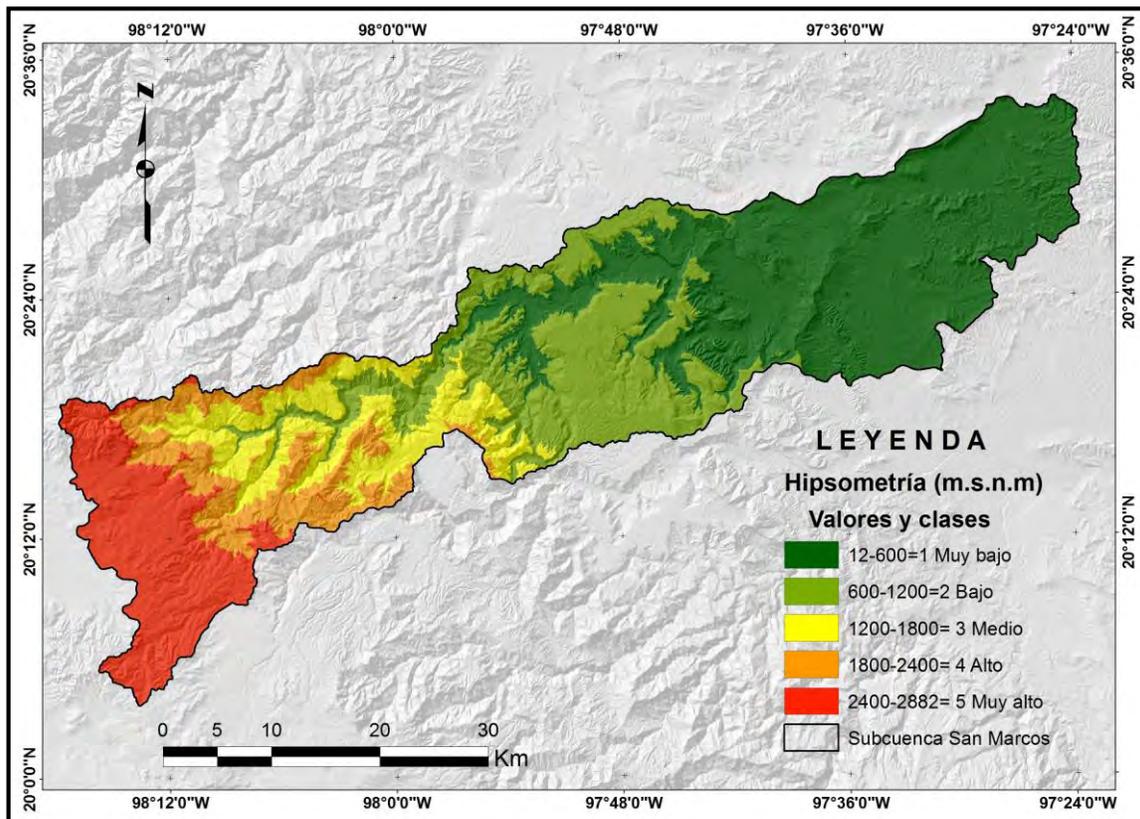


Figura 5.9. Mapa de hipsometría con valores y clases, denota la orografía y distribución de los desniveles topográficos de la subcuenca San Marcos, obtenido del MDE de resolución espacial de 30 m.

La influencia del relieve es transcendental en la amenaza por fenómenos de remoción en masa, dado que la mayoría de las veces se originan éstos, en sitios con mayor diferencias de altitud (García Rodríguez, 2008). Los ejemplos claros son los municipios serranos del estado de Puebla, casos estudiados por: Flores Lorenzo y Alcántara Ayala (2002); Lugo Hubp et al. (2005); Cuanalo et al. (2006); Lucia Capra et al. (2006); Hernández Madrigal (2007), en sus estudios ellos demostraron que la mayoría de los procesos de remoción en masa acontecidos en el año 1999 se observaron principalmente en las laderas más escarpadas, mismos que al combinarse con otros parámetros como la geología, condicionaron cientos de movimientos de terreno. La subcuenca San Marcos no es la excepción, el mapa de hipsometría expresa que las zonas más propensas son aquellas que presentan el mayor desnivel de altitud en la menor área, ubicadas en el centro-noroeste de la subcuenca, afirmación que puede sustentarse con la cartografía previo de deslizamientos (figura 5.4) ya que esta mostró que la porción serrana ha sido mayormente afectada por los PRM en comparación con otros sectores.

5.4.5 Precipitación máxima mensual- Octubre 1999

La lluvia intensa, abundante y continua es uno de los disparadores naturales más importantes en los procesos de remoción en masa. Basta recordar los lamentables hechos acontecidos en la Sierra Norte de Puebla en el año 1999, donde un deslizamiento cobró más de 200 víctimas (CENAPRED, 2002), otro caso es el deslizamiento de la ladera en Río Grijalva del estado de Chiapas en el año 2007, que arrasó con el poblado Juan de Grijalva y la pérdida de 25 vidas humanas (Arvizu-Lara, 2009; Hinojosa-Corona et al., 2011), un suceso muy reciente es el ocurrido el 16-Septiembre-2013 en La Pintada, Guerrero, tras las intensas lluvias causada por el Huracán Manuel, se originó un deslizamiento que sepultó el poblado y al menos 100 personas perdieron la vida (Sánchez, 2004).

Diversos estudios realizados en la Sierra Norte de Puebla señalaron que los cientos de movimientos de laderas ocurridos en el año 1999 fueron disparados por lluvias fuertes e intensas y de corta duración (Flores Lorenzo y Alcántara Ayala

2002; Lugo Hubp et al., 2005; Cuanalo et al., 2006; Lucia Capra et al., 2006; Hernández Madrigal 2007, Borja Baeza, 2012). De allí la idea de incorporar las precipitaciones máximas mensuales en el modelo de susceptibilidad para determinar las zonas más propensas a moverse en caso de un evento extraordinario como los fenómenos meteorológicos del año 1999.

El mapa de lluvias máximas (figura 5.10) de la subcuenca San Marcos, al igual que los mapas anuales de los años 1998 y 1999, señala que la parte central de la subcuenca presenta mayor intensidad de lluvia (>600 mm), puede afirmarse que esto la categoriza como una de las zonas más susceptibles a los movimientos de masa, en la zona de estudio, por ello se le han asignado valores altos de susceptibilidad. Dado que las zonas ubicadas en el este y oeste de la subcuenca presentan precipitaciones bajas (<600 mm), se les estableció niveles bajos de susceptibilidad a PRM. Del mismo modo, los movimientos antiguos se han localizado en el centro-noroeste de la subcuenca, correspondiente a los sitios más lluviosos, por lo que se puede concluir que sí en un futuro se suscita un fenómeno meteorológico similar al del año 1999, seguramente la parte centro-noroeste de la subcuenca sería la más afectada por los movimientos de terreno, ya que ha se visto en los mapas anteriores la mayor incidencia de precipitaciones extraordinarias esta región, cuyos valores se encuentran entre los más altos de la subcuenca, además de contar con la evidencia de los deslizamientos antecedentes.

Es importante mencionar que no solo las lluvias máximas son responsables de los procesos de remoción en masa, sino también la humedad antecedente derivada de la precipitación acumulada (Lugo Hubp et al., 2005). Un claro ejemplo se ilustra en los mapas de precipitación presentados de los años 1998 y 1999, en donde se determinó que los sitios con mayor intensidad de lluvias son los que reportaron deslizamientos, en este caso en la porción serrana de la subcuenca.

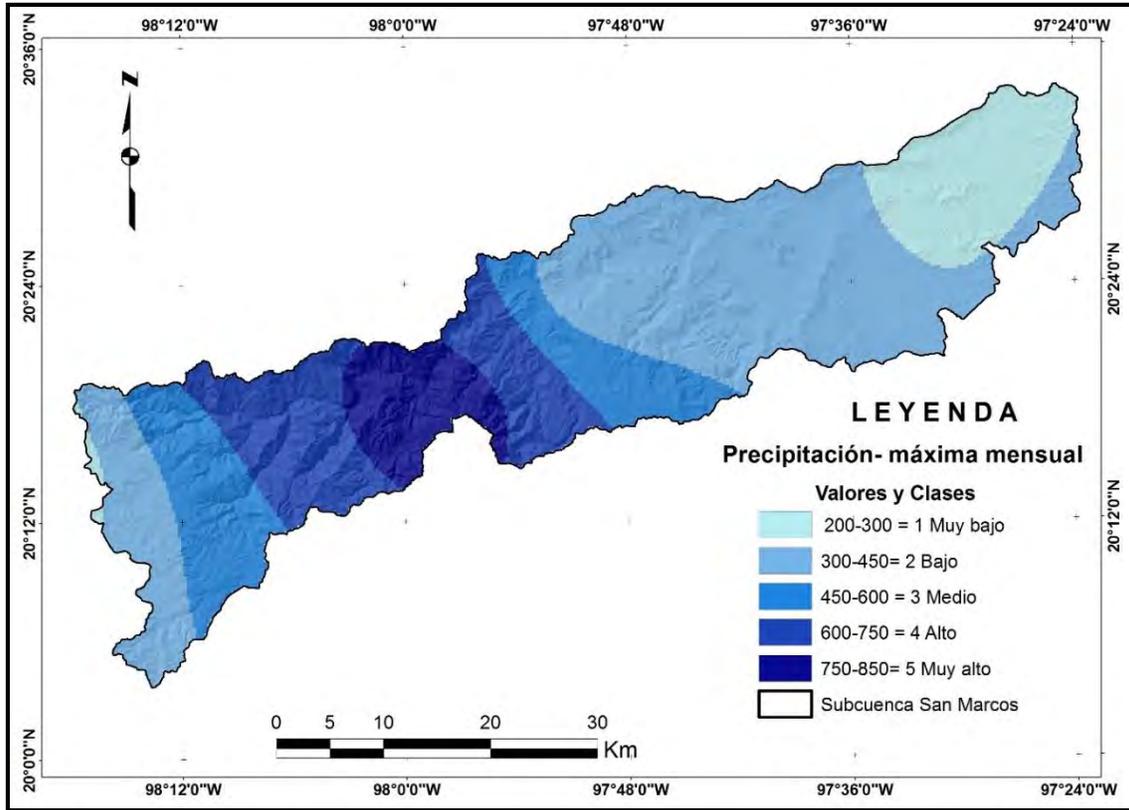


Figura 5.10. Mapa de precipitación máxima del mes de octubre del año 1999, donde se muestra que la parte central de la subcuenca reporta una mayor acumulación de agua de lluvia.

5.5 Zonificación de Susceptibilidad por procesos de remoción en masa

La combinación cualitativa de mapas de los factores condicionantes y desencadenantes permitió generar un mapa final de susceptibilidad a procesos de remoción en masa. Dicho mapa se clasificó en 5 categorías con base a la escala propuesta por (Mora et al., 2002 y CENAPRED, 2004) para superficies bajo amenaza por movimientos de terreno. Así, el mapa final de susceptibilidad (Figura 5.11), resultó con las siguientes clases:

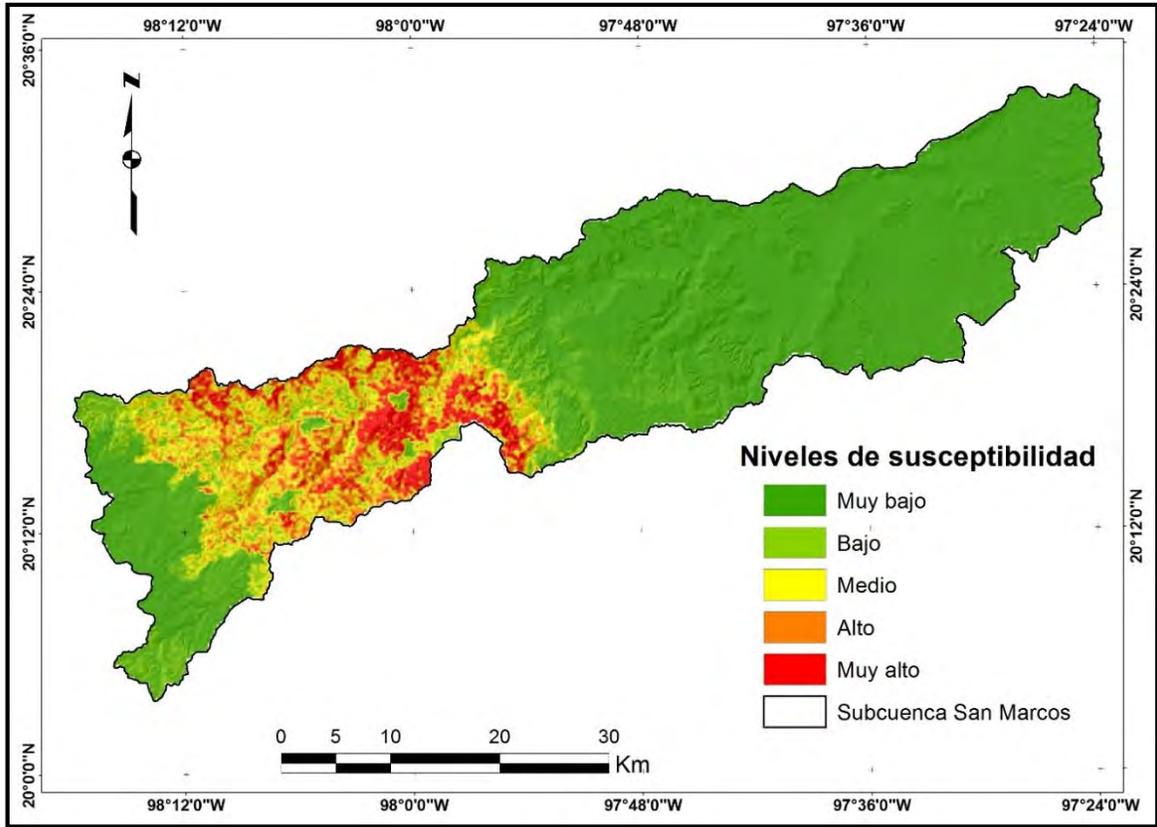
Muy bajo, el 61 % corresponde a sectores estables, se localiza principalmente en el noreste y este de la subcuenca. Según Mora et al. (2002) estos sitios se encuentran en formaciones rocosas no alteradas, sin planos de discontinuidad que conduzca al movimiento de terreno.

Bajo, las zonas de baja susceptibilidad ocupan una mínima porción de la superficie con 9 %, por lo que resulta un poco difícil visualizarlo en el mapa. De acuerdo a Mora et al. (2002), son sitios aún estables, sin embargo se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderado a muy alta.

Medio, ocupa un área de 13 %, se encuentra distribuida en el centro-noroeste de la subcuenca. Las condiciones geológicas en esta zona no son tan favorables, son sitios con moderada presencia de fallas y fracturas, se considera realizar estudios a detalle (por ejemplo geotécnicos) en las zonas bajo esta clasificación donde se pretenda construir ya que la susceptibilidad a PRM es media (Mora et al., 2002).

Alto, corresponde al 10 % de la superficie y se localiza en el centro de la subcuenca. Laderas que muestran zonas de falla y una topografía muy accidentada, ya se han manifestado algunos movimientos gravitacionales, por ello se recomienda realizar estudios a detalle y medidas correctivas que aseguren la estabilidad de las construcciones en el sector. Existe una probabilidad alta de movimientos de terreno en caso de lluvias intensas.

Muy alto, ocupa un área de 7 %, se observan laderas muy escarpadas y con diferencias de desnivel considerable. Es muy posible que los suelos se encuentren saturados de humedad por la gran cantidad de lluvia que recibe la zona. Es importante señalar que estos sitios ya han sido afectados por deslizamientos previos (figura 5.4), por lo que aumenta la probabilidad de la presencia de tales procesos en caso de fenómenos extraordinarios (lluvias y/o sismos).



Mapa 5.11. Mapa de zonificación a la susceptibilidad por procesos de remoción en masa, obtenido mediante la combinación cualitativa de mapas: litología, pendientes, hipsometría, precipitación acumulada anual (1999) y precipitaciones máximas.

Se presenta una tabla y una gráfica en donde se muestran los niveles de susceptibilidad dentro de la subcuenca San Marcos y sus áreas correspondientes.

Tabla 5.4. Superficies resultantes del mapa de zonificación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la subcuenca San Marcos.

categorias	Superficie en km^2	Superficie en %
Muy baja	991.4	61
Baja	151.05	9
Media	221.04	13
Alta	156.6	10
Muy alta	114.3	7
Total	1634.57	100%

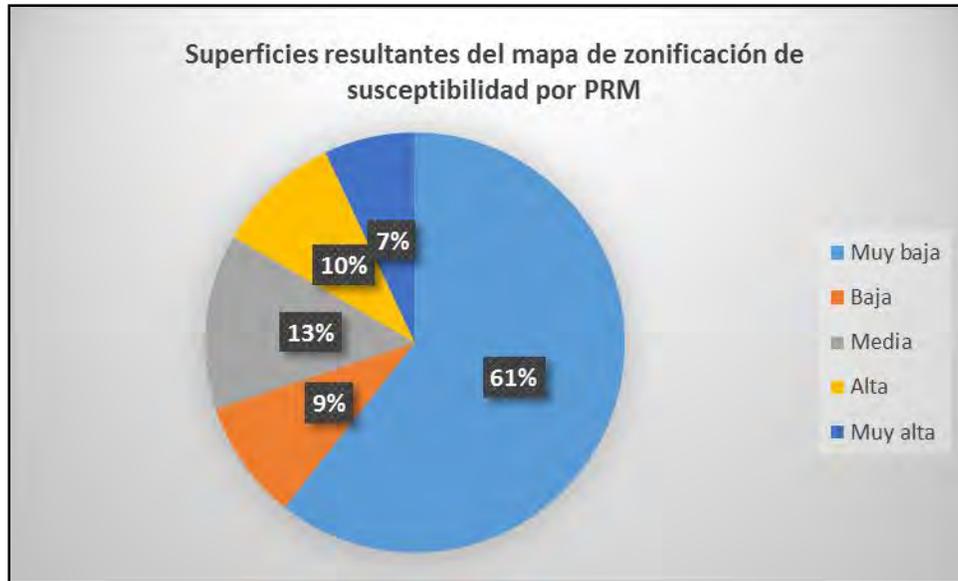


Figura 5.12. Niveles de susceptibilidad por PRM en la subcuenca San Marcos en función del área.

En un contexto general, el mapa final de susceptibilidad por procesos de remoción en masa (Figura 5.11), demostró que las zonas más propensas a ser afectadas por tales procesos, comprende áreas clasificadas de susceptibilidad muy alta, alta y media, se localizan en el centro-noroeste de la subcuenca con un 30 % de la superficie. Las principales localidades que se asientan en esta zona son: San Pablito, Pahuatlán del Valle, Tlacuilotepec, Ozomatlán, Zoquital, San Nicolás, Iczotitla, Xilepa, Xolotla, Loma Larga, Peñales, Temazacalapa, Tlapehuala, Tepetzintla de Galeana, Cuantepec, Tanchitla, Santa Catarina, Zotictla, Chachahuantla, San Juan, Zacapehuaya, Atla, Tlalacruz de Libres, Santa Mónica, Linda Vista y San Martín, Huehuetlilla, Manzano, Toxtla, Nactanca Grande, Infierno, Atequexquitla, Cerro Prieto y Tenextitla, cabe señalar que estos poblados son las más propensas a ser afectadas por deslizamientos. Estos sectores se relacionan con pendientes muy inclinadas (20° - 70°) y alturas moderadas a fuertes (1500-2000 msnm), mayor intensidad y frecuencias de lluvias (>1600), que influyen en el incremento de la humedad. Se compone de lutita arenisca, caliza lutita, y lutita caliza, que se presentan en estratos delgados a gruesos, incluyen grandes fallas, intenso fracturamiento e inclinación de estratos. Respecto al factor disparador, este también demostró una alta precipitación para la zona centro-

noroeste, lluvias >600 mm mensual. Se puede observar que el ambiente para este sector de la subcuenca es muy particular, por la condición geomorfológica y climatológica que presentan, ambos tienen presencia de distintos tipos de movimientos en masa, como flujos de detritos y deslizamientos rotacionales.

Con relación a los sectores de baja susceptibilidad, estos comprenden una superficie de 9 % y se localizan en pequeñas porciones al oeste de la zona de estudio. En esta baja susceptibilidad inciden las rocas volcánicas firmes y duras (basaltos), bajas precipitaciones y pendientes suaves, lo cual no favorece la generación de movimientos de terreno.

Las áreas de muy baja susceptibilidad a movimientos de terreno, corresponden al 61 % de la superficie total de la subcuenca, en su mayoría se ubican hacia el oriente, y corresponde a las partes bajas de la subcuenca con altitud <1000 msnm. Estas zonas se relacionan con los sectores de baja pendiente (<20°) y sitios de menor humedad y menor intensidad de lluvias.

También encontramos estos valores en las zonas más altas de la subcuenca con alturas > 2000 msnm, formadas por rocas volcánicas firmes y duras (basaltos) y pendientes suaves, lo cual ha favorecido la estabilidad de las laderas.

5.6. Validación

Como bien se mencionó en el capítulo de metodología (IV), para validar el mapa de susceptibilidad generado (figura 5.11), se elaboró cartografías con imágenes de satélite y fotografías, ambas extraídas de Google Earth. Tal análisis expone la geomorfología y las condiciones del terreno de la zona de estudio. Las primeras de ellas, señalan las áreas críticas de la zona de estudio y las restantes los sitios estables.

Fueron 16 probables movimientos de terreno que se lograron identificar en las imágenes de satélite (tabla 5.5), algunos de ellos se muestran en la figura 5.13, los mismos representaron un área de 1.06 km^2 .

Tabla 5.5. Inventario de los movimientos de ladera localizadas mediante imágenes de satélite (en Google Earth) de fecha 7-3-2012, en la subcuenca del río San Marcos, incluye la zona, coordenadas geográficas y breve descripción.

No.	Zona	Coordenadas		Descripción
		Latitud	Longitud	
1	Al sur de Tlacuilotepec	20°18'35.01"N	98° 3'34.46"O	Flujo de detritos
2		20°18'7.09"N	98° 3'25.55"O	
3	Vías de comunicación(Mamaiquetla-Pahuatlán, Santa Ana Tzacuala, Honey	20°15'30.93"N	98°07'29.08"W	Inestabilidad de ladera por cortes, reportado en Julio de 2010 por Garrido Carmona.
4		20°15'26.18"N	98°07'30.46"W	
5		20°13'19.14"N	98°10'6.71"O	
6	Cerro de Pericos	20°19'10.52"N	97°57'58.64"W	Deslizamiento de ladera.
7	Al este de Tlacuilotepec	20°19'36.46"N	98°02'40.37"W	Flujo de detritos
8	Coaxcicala	20°14'00.47"N	98°01'38.45"W	Deslizamiento de ladera
9		20°14'00.52"N	98°01'31.16"W	
10	Vías de comunicación (Pahuatlán- Cuauneutla-Tlacuilotepec)	20°18'57.76"N	98°06'49.19W	Flujo de detritos.
11		20°19'2.44"N	98° 4'45.66"O	
12	Carretera rumbo a Tlalacruz-Pahuatlán-Cuauneutla-	20°17'51.41"N	98°07'34.28"W	Deslizamiento de ladera.

	Tlacuilotepec			
13	Al oeste de San Pablito	20°17'42.69"N	98°11'24.20"W	Deslizamiento de ladera.
14	Al suroeste Ozomatlán	20°16'28.16"N	98°02'41.68"W	Deslizamiento de ladera
15	Al noroeste de Metztlá	20°16'57.01"N	98°06'03.86"W	Deslizamiento de ladera
16	Al noreste de Pahuatlán	20°17'19.63"N	98°08'03.21"W	Deslizamiento de ladera

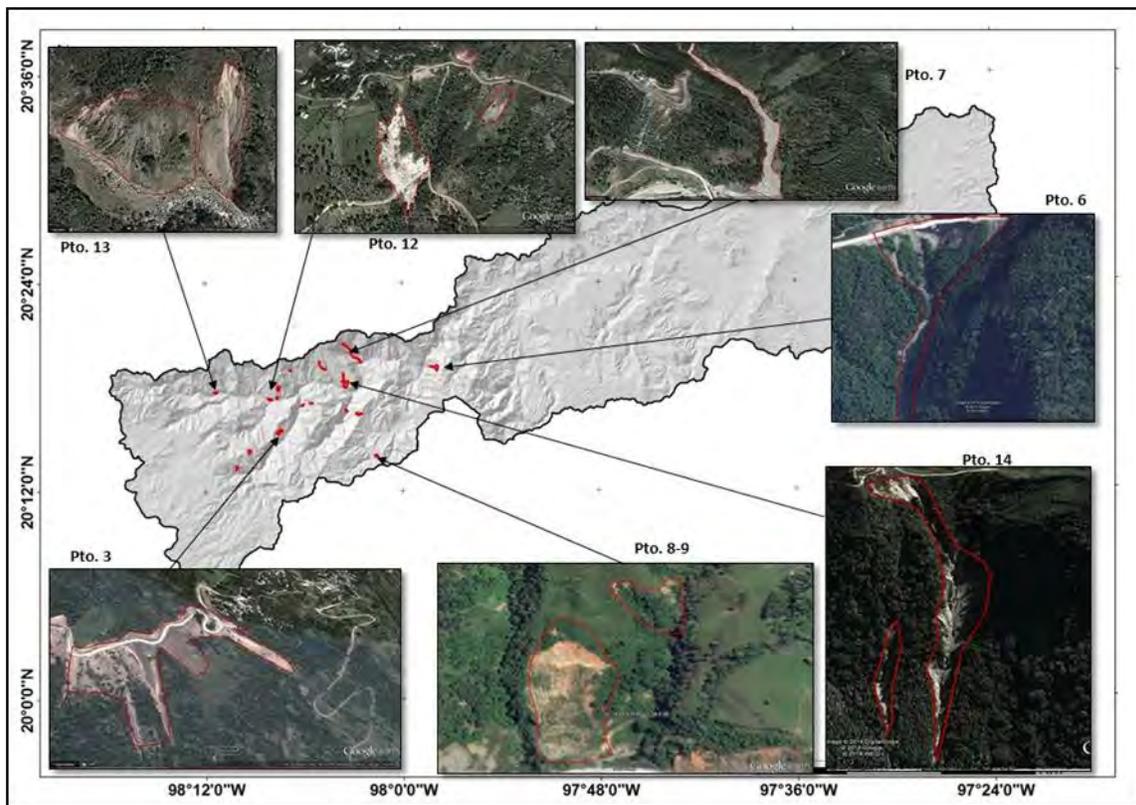


Figura 5.13. Cartografía de áreas críticas, muestran movimientos de terreno identificados sobre imágenes de satélite de fecha (7-3-2012), visualizadas en Google Earth, mismas validan cualitativamente el mapa de susceptibilidad obtenido mediante la combinación de los diversos parámetros. (Ver anexo para una mayor visualización de las fotografías).

Ocho deslizamientos se localizaron en fotografías disponibles en la red vía Google Earth y provenientes de notas periodísticas (figura 5.14). Como bien puede notarse tanto en el mapa anterior (figura 5.13) y en el mapa siguiente (figura 5.14), los movimientos de terreno documentados en los medios se ubican principalmente en el centro-noroeste de la subcuenca correspondiente a la parte serrana de la misma, a lo que se puede concluir que esta zona de la subcuenca es la más propensa a procesos de remoción en masa, debido a los antecedentes.

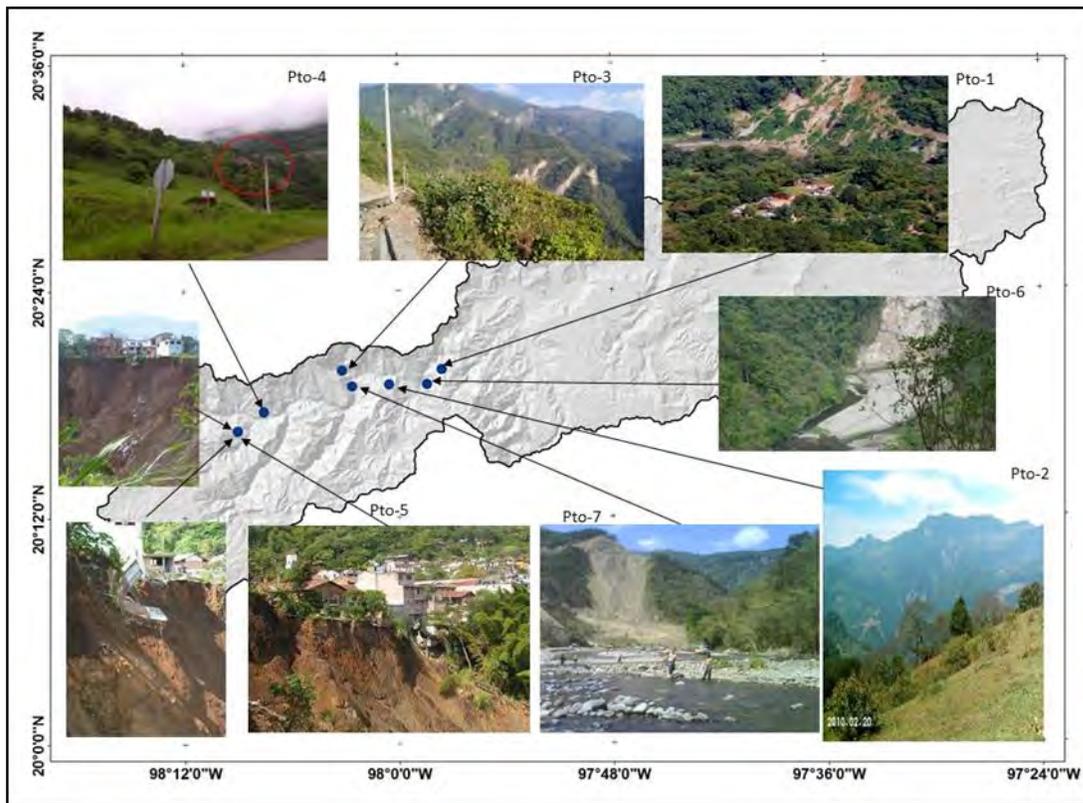


Figura 5.14. Cartografía de áreas críticas, donde se muestra con fotografías (extraídas de la base de datos de Google Earth), los movimientos de terreno en la subcuenca San Marcos. Mismas validan cualitativamente el mapa de susceptibilidad. Fotografías tomadas de Google Earth y notas periodísticas. (Ver anexo para descripción de fotografías y fuente).

Tabla 5.6. Inventario realizado mediante fotografías en base de datos de Google Earth y notas periodísticas, en la subcuenca del río San Marcos incluye coordenadas geográficas

y breve descripción de los movimientos de laderas localizadas. (Ver anexo para detalle de las fotos).

N. punto	Zona	Coordenadas		Descripción
		Latitud	Longitud	
1	Ruta a Tuxpan-Veracruz.	20°19'51.79"N	97°57'33.95"O	Inestabilidad de ladera
2	Al Noreste de Tlapehuala	20°19'3.50"N	98° 0'31.15"O	Cortes de laderas, posible inestabilidad de taludes.
3	Ruta Tlacuilotepec	20°19'48.52"N	98° 3'9.24"O	Se observan laderas sin vegetación, posibles movimientos.
4	Carretera rumbo a Tlalacruz.	20°17'37.09"N	98° 7'33.30"O	Deslizamiento de ladera
5	5 de mayo, Pahuatlán	20°16'35.13"N	98° 9'1.56"O	Deslizamiento ocurrido en la calle 5 de Mayo, Pahuatlán, reportado en Octubre 2007 en la página Tulancingo cultural y en septiembre de 2013, por Ánimas Vargas. No fue posible identificarlo en las imágenes de Google Earth.
6	Cerro de los Pericos, al norte de Xicotepec de Juárez.	20°19'5.17"N	97°58'24.15"O	Deslizamiento de Ladera.
7	Rio Tlacuilo, al Oeste de Tlapehuala	20°18'58.01"N	98° 2'35.50"O	Deslizamiento de ladera.
8	Pahuatlán del Valle			Deslizamiento de ladera

Finalmente se muestran los últimos mapas con información de los sitios estables de la subcuenca San Marcos, también fueron elaborados a partir de las imágenes de satélite y fotografías obtenidas de la página de Google Earth de fecha (19-1-2014). El objetivo de mostrar este análisis es para evidenciar las diferencias en el relieve y geomorfología de ambas zonas de la subcuenca.

Para la obtención de la cartografía de las zonas estables, se colocó puntos arbitrarios sobre las imágenes, se anotaron las coordenadas, se capturaron las imágenes y fotografías de cada punto.

Tabla 5.7. Coordenadas geográficas de las zonas estables de la subcuenca San Marcos, localizadas mediante imágenes de satélite en Google Earth de fecha (1-19-2014).

N. Punto	zona	coordenadas	
		Latitud	Longitud
1	Al norte de Chicualoque, Veracruz.	20°23'41.52"N	97°40'10.98"O
2	Al noroeste de la Col. Guadalupe, Veracruz.	20°20'44.44"N	97°38'1.13"O
3	Col. Arroyo Florido, Veracruz.	20°24'22.53"N	97°30'38.50"O
4	Coatzintla, Veracruz	20°29'15.86"N	97°29'39.36"O
5	Al sur de la Col. Palma Sola, Veracruz.	20°24'33.37"N	97°33'38.14"O
6	Al noreste de Progreso, Puebla	20°27'51.85"N	97°47'58.62"O
7	Al este de Santa Rita, Xicotepec de Juárez, Puebla.	20°22'1.17"N	97°45'47.64"O

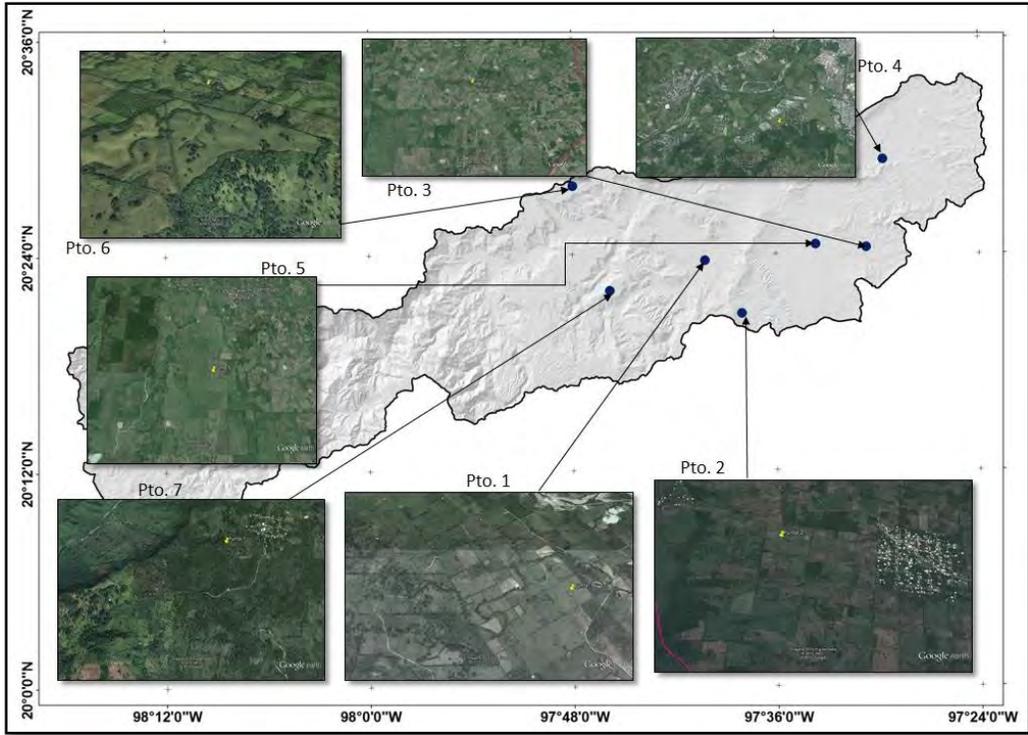


Figura 5.15. Cartografía de áreas estables de la zona de estudio, obtenido mediante imágenes de satélite extraídas de Google Earth de fecha (1-19 2014).

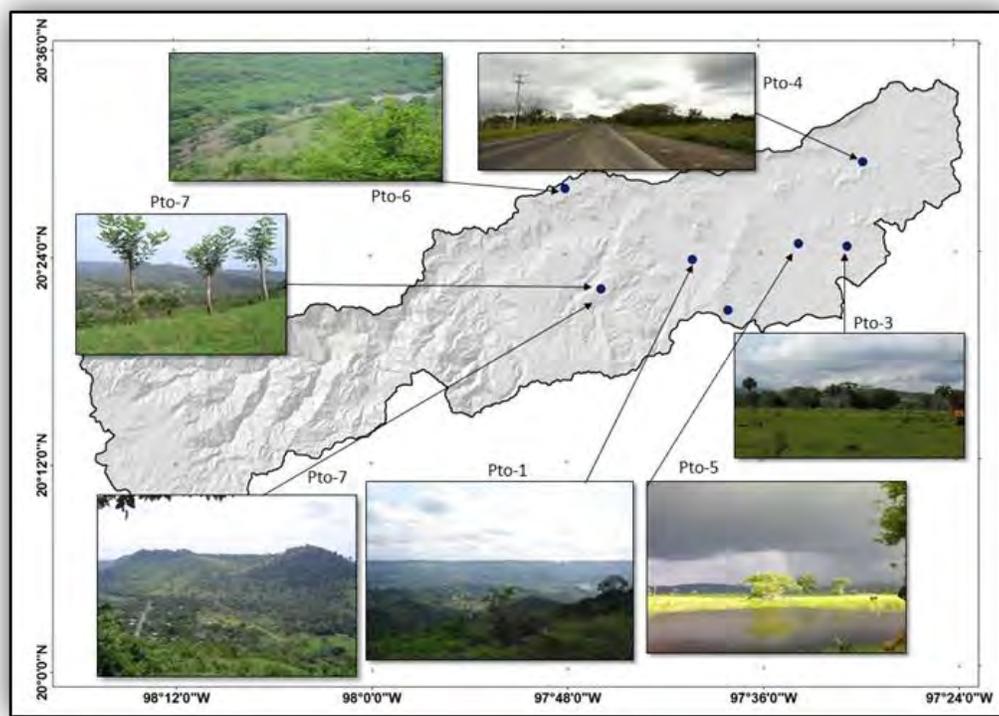


Figura 5.16 Cartografía de áreas estables, muestra con fotografías la geomorfología de la zona oriental de la subcuenca San Marcos (Google Earth 1-19-2014). Fotografías extraídas de Google Earth.

Las cuatro figuras presentadas previamente (figura 5.13, 5.14, 5.15, 5.16), mostraron los sitios más críticos de la zona de estudio así como los sitios estables. Cabe mencionar que dichas cartografías ayudaron a determinar de manera cualitativa el grado de validez del mapa de susceptibilidad final. Para tal caso, se sobrepuso en un SIG la cartografía previa de los deslizamientos con el mapa de susceptibilidad generado (figura 5.17). De esta manera se buscó establecer el grado de coincidencia entre los mapas, se determinó que los sitios marcados como media, alta y muy alta susceptibilidad tienen relación con los polígonos de deslizamientos previos y las áreas señaladas como baja y muy baja susceptibilidad con las zonas estables (figura 5.17) .

También se determinó el porcentaje de movimientos de laderas que coincidió con las zonas de mayor grado de susceptibilidad. Para tal caso, se realizó la siguiente relación:

$\% \text{ exactitud} = (\text{área de los polígonos que se encuentran en las zonas de mayor susceptibilidad}) (100\%) / \text{área total de los polígono de deslizamientos}.$

Datos:

Área total de los polígonos de deslizamiento= 1.06 km^2

Áreas de los polígonos que se encuentran en las zonas de mayor susceptibilidad:

Muy alta susceptibilidad: 0.413 km^2 , Alta: 0.435 km^2 , Medio: 0.116 km^2 , bajo: 0.096 km^2

Total de muy alta, alta y media susceptibilidad: 0.964 km^2

Sustitución:

$\% \text{ exactitud} = 0.964 (100)/1.06 = \mathbf{91\%}.$

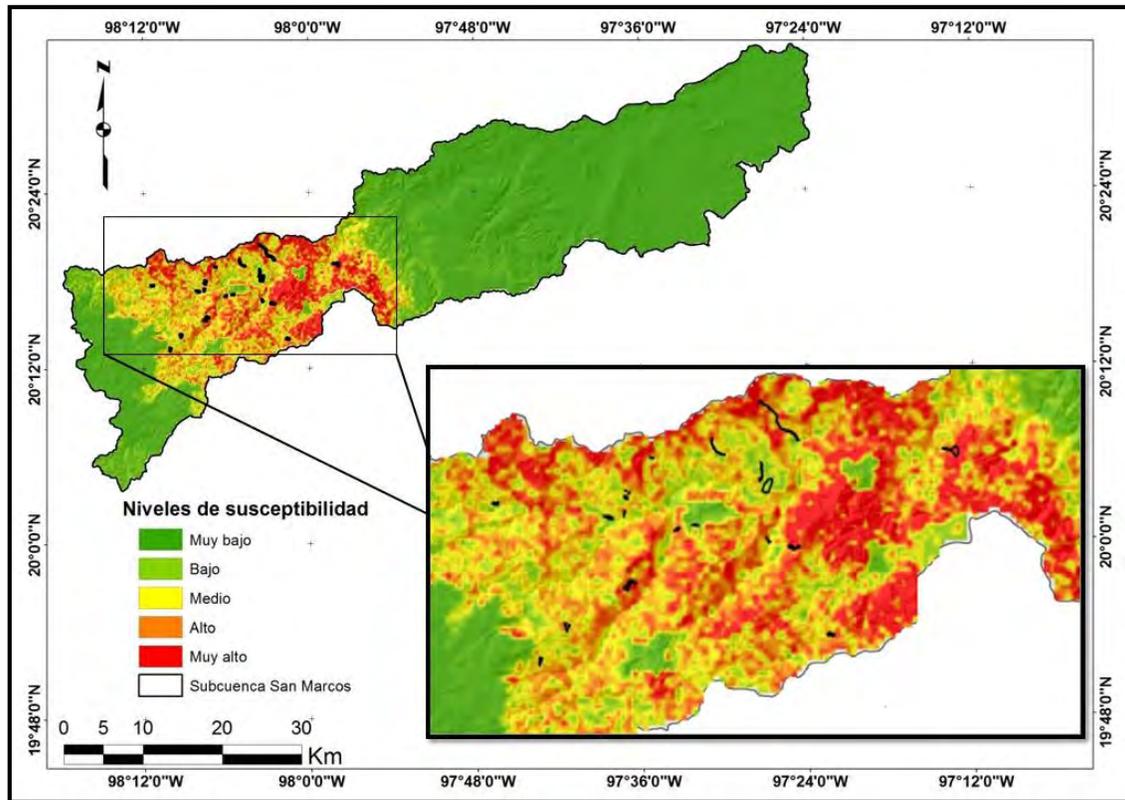


Figura 5.17. Superposición de la cartografía de susceptibilidad con el mapa de procesos de remoción en masa identificados mediante imágenes de satélite. Se observa que los movimientos de laderas se localizan principalmente en los sitios clasificados como media, alta y muy alta susceptibilidad. Los polígonos negros representan los eventos de PRM dentro de la subcuenca San Marcos.

La superposición de los polígonos de deslizamientos con el mapa de susceptibilidad final (Figura 5.17) reveló que el 38.9% de los movimientos de terreno ocurrieron en las zonas clasificadas como de “muy alta susceptibilidad”; el 41 % en zonas de “alta susceptibilidad”; el 11% en zonas de “moderada susceptibilidad”; y el 9 % en zonas de “baja susceptibilidad”. Los sitios con “muy baja susceptibilidad” no fueron afectados por dichos procesos. Es muy probable que los futuros deslizamientos se presenten en los sitios clasificados como muy alta, alta y media susceptibilidad, dado que el escenario geomorfológico de ese sitio ofrece peculiaridades que pueden dar origen a una compleja problemática de movimientos del terreno. De acuerdo a los datos de porcentajes adquiridos previamente, puede indicarse que el mapa de susceptibilidad obtenido tiene un certeza de 91 %, debido a que los movimientos de terreno de validación fueron identificados principalmente en la zona de muy alta, alta y media susceptibilidad.

5.7. Discusión de los resultados

5.7.1 Análisis de la morfometría de las subcuencas

Los índices morfométricos de la subcuenca San Marcos, por si solos sugieren alta posibilidad de la presencia de deslizamientos. La alta densidad de drenaje debilita los materiales litológicos y produce a una vegetación escasa. Los cambios fuertes de altitud condicionan diversidad de climas, por ejemplo, lluvias intensas en las partes más altas y montañosas. El relieve accidentado favorece la erosión del suelo por el transporte rápido del agua.

Por otro lado, los datos morfométricos de las subcuencas resultaron ser muy similares, lo que indica que las condiciones geomorfológicas de los deslizamientos ocurridos en la subcuenca Tehuantepec pueden ser similares a las condiciones que conducirían a la inestabilidad de laderas en el sitio de interés. La técnica de los parámetros físicos y la comparación de éstos entre cuencas, no es la más aplicada para determinar la susceptibilidad por PRM. Al respecto, existen muy pocos trabajos bajo este concepto. Sin embargo, es importante mencionar que el conocimiento de la geoforma del terreno facilita el análisis, la evaluación y zonificación de la amenaza por inundaciones, movimientos de terreno, aludes

torrenciales y el diseño de sistemas de alerta (Méndez Williams y Marcucci Ettore, 2006).

5.7.2 Mapa de susceptibilidad por PRM en la subcuenca del río San

Marcos

Los mapas de susceptibilidad a procesos de remoción en masa pueden ser preparados usando diferentes técnicas. La selección de ella depende directamente de las necesidades y el alcance del Geocientífico. En este estudio se utilizó el método heurístico de Mora y Vahrson (1994) modificado por Mora et al. (2004) y posteriormente modificado para la zona de estudio. Es el único método que trabaja con áreas muy extensas, además es muy rápido y resulta sencillo aplicarlo, los parámetros que maneja pueden determinarse de forma económica mediante trabajo de gabinete. En comparación con otros métodos, por ejemplo, el método determinístico y el estadístico que requieren de cuantiosos datos, como los estudios de mecánica de suelos (espesor y resistencia de suelo, presión de poro, etc.) que implican un intenso trabajo de campo y una logística costosa. Muchas veces los datos requeridos para estos modelos son difícil de obtener, por lo que resultan inconsistentes por estar incompletos. En efecto, el objetivo del trabajo es obtener una zonificación de la susceptibilidad de manera remota, con datos disponibles y sin necesidad de ir al campo o de alguna manera, previo a esta etapa. En la mayoría de las veces, las zonas de estudio por PRM son grandes y requieren de recursos económicos y de tiempo muy amplios, por lo que acotar las áreas desde el gabinete servirá para definir aquellas áreas que requieren mayor atención y dejar el resto con validaciones puntuales menores.

El modelo heurístico es conocido como subjetivo, dado que depende de la experiencia y juicio del especialista en la correcta elección de los factores condicionantes y desencadenantes y en la asignación exacta de los valores para cada factor analizado (Gómez et al. 2003; Barrantes Catillo et al. 2011; Segura et al., 2011). Cardozo (2008) considera que la estimación de la susceptibilidad mediante esta técnica mejora cuando se consideran los factores que reflejan más adecuadamente el comportamiento de las laderas. En este sentido, la elección de

las variables condicionantes y desencadenantes de los procesos de remoción en masa en la subcuenca San Marcos, está en función de la disponibilidad y calidad de la literatura técnica, científica y hemerográfica local y del análisis morfométrico de la zona. Así, la pendiente del terreno, la altitud, litología, precipitación anual y mensual fueron reconocidos como cinco de los parámetros más importantes a considerar para el análisis de la inestabilidad del terreno. Con esta información, en su conjunto se logró la obtención del primer mapa de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la zona de estudio. El mismo, mostró resultados aceptables, en comparación con otros trabajos, ya que el 91 % de los movimientos de terreno de validación fueron identificados en la zona de muy alta, alta y media susceptibilidad, mientras que Cardozo (2008) obtuvo una confiabilidad de 75% correspondiente a la superficie de susceptibilidad alta, Segura et al., (2011) obtuvieron una certeza de 48.4 % correspondiente en áreas de alta y moderada susceptibilidad. Cabe señalar que los mejores resultados obtenidos hasta el momento en la literatura, muestran que sólo el 80% de las unidades de terreno pueden ser clasificadas apropiadamente según su grado de inestabilidad (Baeza y Corominas 2001). Según Moreiras, (2009) esto se debe posiblemente a la falta de interpretación de los mecanismos naturales que actúan.

La pendiente del terreno, la altitud, litología, precipitación anual y mensual, ejercieron un control importante en los niveles de susceptibilidad obtenidos en el mapa final. De este modo, se expusieron 5 niveles de susceptibilidad dentro de la zona de estudio: muy baja con 61% de superficie, baja 9 %, media 13 %, alta 10 %, muy alta 7%. Los sitios clasificados como susceptibilidad alta, muy alta y media, son las más propensas a deslizarse, dado que son sitios asociados con unidades litológicas en estratos delgados a gruesos (lutita arenisca, lutita caliza y caliza lutita) y tienen baja resistencia al intemperismo y a la erosión, incluyen fallas e intenso fracturamiento en donde se infiltra el agua. De acuerdo a Lugo Hubp y colaboradores (2005), estas rocas reúnen condiciones favorables de caídas y deslizamiento, principalmente. Los mismos autores señalan que los movimientos de masa ocurridos en los municipios cercanos de la zona de estudio en el año 1999, se debieron a la debilidad estructural de las lutitas y la forma del relieve. Del

mismo modo Capra et al. (2006), indican que la estructura geológica plegada con alternancia de rocas de distinta competencia y que además buzan a favor de la pendiente, representan un factor clave en la inestabilidad de la ladera. Las condiciones geológicas de la parte centro-noreste de la subcuenca se le agrega el relieve con pendientes moderadas a muy pronunciadas (20°-70°) considerando que el gradiente de una ladera incrementa la probabilidad de falla (Dai y Lee 2002), resultados similares obtuvieron Hernández Mena (2008) y Segura et al. (2011), quienes señalaron que las zonas más inclinadas, con pendientes mayores de 20° son las más afectadas por tales fenómenos.

Por otro lado, se tienen lluvias abundantes mensuales que oscilan entre 450-800 mm, lo que incrementa la susceptibilidad a PRM en la parte centro-noroeste de la subcuenca. Se han visto casos en donde las lluvias intensas y de corta duración han sido el mecanismo disparador de cientos de deslizamientos, como ocurrió en octubre de 1999 en los municipios serranos de Puebla por la llegada de una depresión tropical, generando un “clustering” de deslizamientos ya que las zonas con geología y topografía similar, llegan a sobrepasar su punto de resistencia en tiempos similares. Cabe mencionar que la subcuenca San Marcos no fue altamente afectado por los fenómenos de remoción en masa para aquel año, sin embargo, sí se reportaron precipitaciones abundantes, quizá no fue suficiente para debilitar la estructura de las laderas, pero no se descarta que en un futuro sea perturbado por estos fenómenos, ya que las condiciones climáticas y geomorfológicas de la zona de estudio principalmente en la porción centro-noroeste sugieren la presencia de estos eventos. También es importante considerar la importancia de las lluvias anuales en el origen de los movimientos de terreno, ya que no solo las lluvias máximas son responsables de los procesos de remoción en masa, sino también la humedad antecedente derivada de la precipitación acumulada (Lugo Hubp et al., 2005), como es el caso de la zona de estudio, donde los datos de precipitación tanto del año 1998 y 1999 muestran claramente que los sitios con abundantes lluvias (> 1600 mm) son los que presentan mayor afectación por deslizamientos.

El mapa de altitudes expresa que el sector centro-noreste corresponde a una porción de la Sierra Madre Oriental, donde se distinguen cambios orográficos considerables, mismos que forman una pared orográfica que obstruye los vientos provenientes del Golfo de México, por lo tanto al chocar los vientos con la sierra y elevarse este, deja caer en forma de lluvia gran parte de su humedad, este es un factor más que apoya el considerar esta parte de la subcuenca como la más propensa a presentar movimientos de terreno por recibir y acumular mayor cantidad de agua.

Las zonas de baja y muy baja susceptibilidad comprenden la mayor parte de la superficie de la subcuenca, con un área de 70%, y están presentes en dos sectores: al este y al oeste de la subcuenca. Es muy probable que en la baja susceptibilidad ubicada en el este de la zona de estudio influyan los parámetros de precipitaciones escasas, pendientes suaves y los desniveles bajos. Hacia el oeste de la subcuenca, seguramente inciden las rocas basálticas principalmente, caracterizadas por ser sanas y duras, las pendientes ligeras y la baja precipitación que recibe la zona, aunque se consideró también la presencia de tobas no consolidadas sobre unidades del Terciario y Mesozoico, asimilando las características de contactos geológicos entre rocas heterogéneas, lo cual puede ser factor primordial para formación de planos de dislocamiento.

Otro parámetro condicionante que puede influir altamente en la estabilidad de las laderas, es la cobertura vegetal. Se estudió la posibilidad de incorporarlo en el modelo de susceptibilidad, ya que es bien sabido el papel que juega la vegetación en fijar los suelos superficiales, además absorben el agua contenida en el suelo y atenúan la erosión superficial al mitigar el impacto de las gotas de lluvia y reducir la velocidad de escurrimiento (CENAPRED, 2002, Cuanalo et al., 2011).

Sin embargo no se pudo dar el seguimiento del cambio de uso de suelo, debido a la falta de información espacial. Las imágenes de Landsat TM5 que cubren la zona estudio presentaron grandes problemas de nubosidad, esto deriva en la obtención de resultados poco confiables. Se analizó una sola imagen que corresponde el año 1999, el cual no reportó información muy relevante para incluirlo en el modelo,

dado que para aquel año la vegetación aún se encontraba en condiciones favorables a diferencia en estos últimos 10 años en donde la intervención antrópica ha jugado un papel importante (deforestación para inducir cultivos, pastizales, construcción civil, desarrollo de actividades ganaderas, caminos y terracerías, etc.) tal como lo reporta Castelán Vega (2007) y el INEGI (2010). De ninguna manera se considera que la variable “Cobertura vegetal y uso de suelo” carece de relevancia para ser incorporada en el modelo de susceptibilidad por procesos de remoción en masa. Al contrario, se le reconoce su gran importancia como agente regulador y en el contexto de los procesos erosivos, en particular en lo que respecta a los movimientos de terreno; sería recomendable que posteriores estudios consideren otra fuente de información de sensores remotos para evaluar esta variable, ya que la que se pretendió utilizar contenía una gran cobertura de nubes, característico de la zona geográfica.

En cuanto al factor “sismo”, parámetro desencadenante sugerido por Mora y Vahrson (1994), no fue posible incluirlo en nuestro modelo, ya que el Servicio Sismológico Nacional (SSN) no reporta sucesos relevantes acerca de este fenómeno en la zona de estudio.

Otros factores que se consideran importantes y que podrían incorporarse al modelo, aunque fuera del alcance de este estudio, incluyen la orientación de laderas, que permite conocer la orientación de una ladera respecto a los puntos cardinales y las condiciones de humedad que guarda debido a la influencia del sol sobre ella (Hernández Mena, 2008); y la red drenaje, ya que se considera que pueden causar serios problemas de erosión y socavamiento (Junco, 2004; Bathrellos et al., 2009). Hay infinidad de variables que se podrían añadir al modelo para obtener un resultado de susceptibilidad altamente confiable. Sin embargo, según Cardozo (2008) no todos los factores aportan información de igual importancia, por lo que en futuros trabajos se debería analizar si el incremento del número de variables en el modelo, mejora la calidad de la predicción.

El modelo heurístico de Mora y Vahrson, debe ser validado, sí esto no se lleva acabo el trabajo tiene muy poco significado científico. Es importante mencionar

que el propio autor de esta metodología no presenta ningún tipo de validación en sus estudios, por lo que, resulta poco confiable los resultados logrados. A diferencia del presente trabajo, para determinar el grado de certeza del mapa de susceptibilidad obtenido, se elaboró un análisis de los deslizamientos previos mediante imágenes de satélite (disponibles en Google Earth), así como también se obtuvo un análisis de los sitios reportados con baja susceptibilidad. Sin embargo, no es la única forma de validar un mapa de susceptibilidad, un inventario realizado en campo, resulta uno de los aspectos más relevantes, pero presenta algunos retos también, tal como validó Hernández Mena (2008). Otro recurso empleado son las imágenes de satélite de alta resolución por ejemplo: SPOT-4 de 10 m de resolución empleado por Cardozo (2008), fotografías aéreas de alta resolución por (Segura et al., 2008), imágenes IKONOS de 1 metro de resolución tal como lo hizo (Ochoa Tejada y François Parrot 2007). Es sabido que los productos espaciales de alta resolución son muy costosos y el presente proyecto carecía de financiamiento para dichos costos, fue el principal motivo para no adquirirlas, por lo que se utilizó material gratuito. Las imágenes del satélite de la página de Google Earth están disponibles para el público, las cuales cuentan con muy buena resolución espacial y resultó suficiente para identificar los deslizamientos existentes y permitieron establecer una relación satisfactoria entre las cicatrices de los movimientos de la imagen y los resultados de la clasificación del mapa final de susceptibilidad. Otro aspecto importante de este trabajo es que además de los factores condicionantes y desencadenes que Mora y Vahrson proponen para determinar la amenaza de un sitio determinado, se realizó el análisis morfométrico de la subcuenca, ya que las características de la cuenca (orden, magnitud, densidad de drenaje, desniveles, gradiente, etc.), reflejan la evolución geomorfológica y brindan información fundamental sobre los procesos de remoción en masa (Carrara et al., 1995).

En resumen, la relevancia del presente trabajo y que distingue de otros, como los trabajos de Cardozo (2008), Hernández Mena (2008), Segura et al. (2011), Barrantes castillo et al. (2011), radica en los siguientes aspectos: es un estudio realizado mediante trabajos de gabinete utilizando datos espaciales disponibles,

los cuales permitieron obtener un resultado confiable y efectivo para determinar los niveles de susceptibilidad a PRM y delimitar zonas a revisar puntualmente (áreas críticas) y de esta manera reducir costos fuertes y trabajos extensos de campo. La técnica aplicada demuestra ser relativamente rápida para realizar estudios de los PRM. Los índices de susceptibilidad son presentados mediante un mapa que señala puntualmente las zonas que requieren atención inmediata, además, va acompañado de una cartografía con fotografías e imágenes que validan el mapa de susceptibilidad, esto en conjunto, facilita aún más el entendimiento de estos peligros, pues dichas cartografías muestran visualmente la peligrosidad. Los resultados podrían ser empleados por instituciones dedicadas al área de prevención y mitigación de la amenaza por fenómenos naturales (Protección Civil) y de esa forma se crea una alerta en la población, reduciendo daños perjudiciales como: pérdida de vidas y pérdidas económicas.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

La subcuenca San Marcos presenta una condición geomorfológica, climática y geológica que favorece a los deslizamientos del terreno. Por esta razón, en este trabajo se realizó un análisis de los factores intrínsecos de la ladera, así como, los factores externos; con la finalidad de determinar los sitios más propensos a presentar procesos de remoción en masa (PRM).

Para la obtención del mapa de susceptibilidad de los movimientos de terreno de la subcuenca San Marcos, se analizaron datos de precipitación de los años 1998 y 1999, se digitalizó e interpretó la información geológica y se clasificó las pendientes y alturas a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Con estos datos se generaron mapas temáticos de litología, pendientes, hipsometría, precipitación anual y mensual, con los cuales se desarrolló un SIG para obtener el mapa de susceptibilidad por PRM. Aunque la cobertura vegetal es un parámetro condicionante de importancia, se omitió por carencia de datos de buena calidad.

El mapa de susceptibilidad por PRM expuso 5 niveles de susceptibilidad dentro de la zona de estudio: a) muy baja, la cual ocupa un 61% de la superficie; b) baja,

ocupando 9%; c) media con 13% de la superficie total; d) alta con 10 % y; e) muy alta, ocupando el 7% de toda la superficie de la zona.

Alrededor del 30% de la superficie de la subcuenca es propensa a inestabilidad, esta área se concentra principalmente en el centro-noroeste de la subcuenca. Para dicha zona se determinó que la influencia de factores como: rocas sedimentarias (caliza lutita, lutita arenisca, lutita caliza) con abundantes fallas, fracturas y plegamiento, lluvias intensas (> 1600 mm), altas pendientes ($>20^\circ$) y los desniveles del terreno son los principales condicionantes para la presencia de PRM. Es importante mencionar que este sector de la subcuenca se encuentra altamente poblado, (figura 6.1).

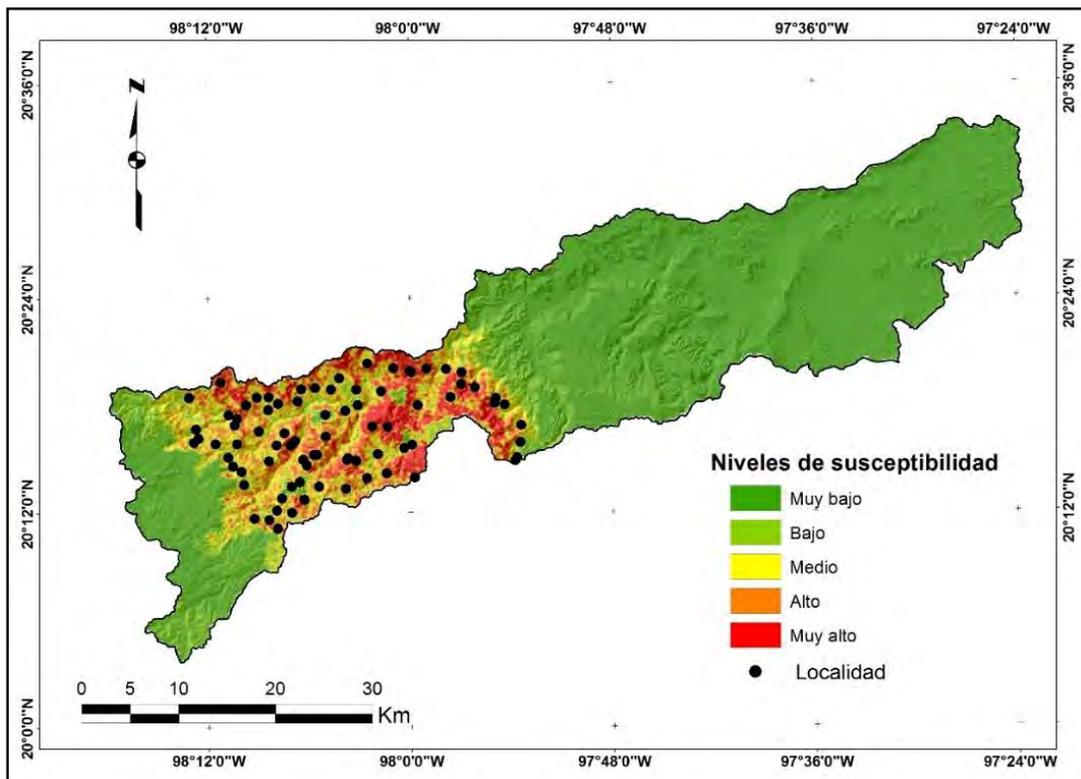


Figura 6.1. Mapa que muestra diferentes niveles de susceptibilidad y las localidades asentadas en ellas.

En las zonas clasificadas como de muy alta susceptibilidad se asientan las siguientes localidades: San Pablito, Pahuatlán del Valle, Tlacuilotepec, Ozomatlán, Zoquital, San Nicolás, Iczotitla, Xilepa, Xolotla, Loma Larga, Peñales, Temazacalapa, Tlapehuala, Tepetzintla de Galeana, Cuantepec y Tanchitla. En

zonas de susceptibilidad alta las comunidades son: Santa Catarina, Zotictla, Chachahuantla, San Juan, Zacapehuaya, Atla, Tlalcruz de Libres, Santa Mónica, Linda Vista y San Martín; y en la zonas de susceptibilidad media: Huehuatlilla, Manzano, Toxtla, Nactanca Grande, Infierno, Atequexquitla, Cerro Prieto y Tenextitla.

Los índices morfométricos permitieron reconocer que cerca del 50% de la superficie de la subcuenca San Marcos está constituida por relieve montañoso, pendientes pronunciadas y diferencias de altitud muy fuertes. Así también reveló que los datos de la densidad de drenaje inciden negativamente en la vegetación y en los materiales geológicos y edafológicos. Estas características hacen que esta zona sea susceptible a peligros naturales, tales como deslizamientos y otros procesos erosivos.

Este estudio demuestra ser una manera eficaz y relativamente rápida para reconocer zonas con mayor susceptibilidad para realizar estudios de PRM, primero reconociendo las zonas más susceptibles y posteriormente con su validación en campo o en gabinete, es por esto que su aplicación en zonas donde existen estos procesos puede ahorrar recursos económicos sustanciales a un proyecto, ya que acota las zonas a revisar puntualmente.

Para que el modelo heurístico de Mora y Vahrson sea aún más efectivo, es necesario adecuarlo de acuerdo a las características de un sitio determinado, tal como lo propone Cardozo (2008). Para el caso de la zona de estudio, con el objetivo de obtener resultados más cercanos a la realidad, se modificó el modelo incluyendo otros parámetros (hipsometría y precipitaciones anuales). Cabe mencionar que el modelo puede aún mejorarse, incluyendo más parámetros, como la humedad del suelo, el tipo de suelo, hacer un análisis exhaustivo acerca de los tipos de cobertura vegetal existente en una zona determinada y analizar la intervención humana en los cambios de uso de suelo.

Para validar el mapa de susceptibilidad obtenido (figura 5.11), se compararon las áreas que resultaron con alta susceptibilidad, con un mapa donde se ubicaron puntualmente los polígonos de deslizamientos ocurridos en la parte central-

noroeste de la subcuenca, obteniéndose una buena correspondencia (91%), lo cual pone de manifiesto que el mapa de susceptibilidad puede ser usado como un modelo predictivo (con reservas), para la localización de futuros movimientos en masa.

Es recomendable promover entre la población local el conocimiento de la exposición y vulnerabilidad ante este peligro geológico. Por ello, se ha incluido el mapa de susceptibilidad con diferentes niveles de amenaza y las poblaciones que se asientan en las zonas más susceptibles (figura 6.1). También se incluyó la cartografía de deslizamientos con imágenes y fotografías que muestran claramente la peligrosidad existente en la parte centro-noroeste de la zona de estudio. Estos mapas pueden ser de gran utilidad para evitar daños a la población.

Se sugiere que en futuros estudios se utilicen imágenes de alta resolución para identificar los movimientos de terreno con mayor precisión, o bien, hacer un inventario de campo en el que se incluyan características como: el tipo de movimiento presente, volumen y material involucrado, de esta manera se tendría una validación más precisa.

Los sitios con niveles altos y muy altos de susceptibilidad deberían ser monitoreados constantemente para evitar daños a la población, sobretodo en temporada de lluvias. Debido a las características de la zona, no es recomendable realizar construcciones que impliquen un sobre peso al terreno. En su lugar, estas áreas deberían considerarse como área protegida, zonas de reforestación, manejo ambiental, etc. Para las zonas con susceptibilidad media, se debe implementar un estudio geotécnico a detalle, para tomar las medidas adecuadas sobre el uso del terreno.

Aquellos sectores que se definieron como de baja y muy baja susceptibilidad a PRM, son considerados como sitios estables y podrán ser utilizadas para desarrollo de diferentes actividades productivas como: agricultura, ganadería, pesca, construcción civil, etc., siempre y cuando respeten las normas catastrales y del ordenamiento del territorio.

Los resultados de zonificación pueden ser utilizados como una guía aproximada y preventiva, además como una herramienta para el ordenamiento territorial, planificación urbana y para el diseño de proyectos de obras civiles. También puede servir como base para futuros estudios hidrológicos, de riesgo por inundaciones y por movimientos de laderas.

Es importante mencionar que el día 15 de junio del 2015, mientras se escribía este estudio, sucedieron caídas de rocas y deslizamientos, originados por lluvias intensas en el municipio de Tlatlauquitepec, localizado en la Sierra Norte de Puebla (al SE del área de estudio) afectando la carretera Pezmatlán-Mazatepec (kilómetro 27+200) en el punto denominado como Banco-Negro y dejando incomunicadas siete localidades, entre ellos: Coateczin, Tepetzintla, La Primavera, San José Chachaltzin, Chililistipan, Calatepec y Mazatepec. (Ver fotografía 25, en el anexo).

Referencias

- Alcántara-Ayala, I. (2000). Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definición, clasificaciones y terminología. *Boletín del instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México*, 41, 7-25.
- Alcántara-Ayala, I. (2004) Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexico. *Geomorphology*, 61,19-40.
- Alcántara-Ayala, I., y Murillo García, F. (2008). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 47-64.
- Alcántara-Ayala, I., Borja Baeza, R.C., López, J.M. (2003). Valoración económica del servicio de ecosistema: prevención de desastres. Instituto nacional de ecología, 6-35.
- Arena-Islas, D., Esquivel-Macías, C., y Flores-Castro. (2009). Amonoideos y bivalvos del Sinemuriano Superior en un nuevo afloramiento de la Formación Huayacocotla, Hidalgo, México, algunas consideraciones paleoambientales, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 61(2) ,185-197.
- Aristizábal, E. y Yokota, S. (2006). Geomorfología aplicada a la ocurrencia de deslizamientos en el valle de Aburra. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Sistema de Información Científica*, 73 (149) ,5-16.
- Aristizábal, E., Martínez, H., e Ignacio Veléz, J. (2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *Ciencias*, 34(131) ,209-227.
- Argis Resource Center. Explorar modelos digitales de elevación. Recuperado el 11 de Febrero de 2015 de: <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html>
- Arvizu- Lara, G. (2013). El deslizamiento en el río Grijalva Chiapas. *Ai México*, 1-25.
- Aster Global Digital Elevation Model (GDEM) versión 2 (2011). Recuperado el 11 de Febrero de 2015 de: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/4.html>
- Azpeitia-Caballero, A. (2007). Minerales de los distritos mineros metálicos Zimapán, Pachuca-Real del Monte, Molango y su aplicación didáctica. (Tesis maestría). Área académica de materiales y metalurgia. Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, 7-12.
- Baeza, C. y Corominas, J. (2001). Assessment of shallow landslide susceptibility by means of multivariate statistical techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, Balkema 26: 1251-1263.DOI: 10.1002/esp.263, Rotterdam.
- Barrantes-Castillo, G., Barrantes Sotela, O., y Núñez Roman, O. (2011). Efectividad de la metodología Mora-Vahrson modificada en el caso de los deslizamientos provocados por el terremoto de Chinchona, Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, 47,141-162.

- Bathrellos, G. D., Kalivas, D.P., & Skilodimou, H.D. (2009). GIS-based landslide susceptibility mapping models applied to natural and urban planning in Trikala, Central Greece. *Estudios Geológicos*, 65(1), 49-65.
- Bitrán-Bitrán, D. (2001). Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980-99. SEGOB. Sistema Nacional de Protección Civil.
- Blaikie, P., Cannon, T., DAavid, I., y Wisner, B. (1996). Vulnerabilidad; el entorno social, político y económico de los desastres. Red de Estudios Sociales y Económicos de Desastres en América Latina (LA RED).
- Borja-Baeza, R.C. (2012), *Diseño de un sistema de alerta temprana para mitigar el impacto generado por inestabilidad de laderas, Tlatlahuquitepec, Sierra Norte de Puebla*. (Tesis doctoral). Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, México.
- Borja-Baeza, R.C., y Alcántara Ayala, I. (2004). Procesos de remoción en masa y riesgo asociados en Zacapoaxtla, Puebla. *Boletín del instituto de geografía, UNAM*, (23), 7-26.
- Brabb, E.E. (1984) Innovative approaches to landslide hazard mapping. Proceed. IV Int. Symp. Landslides, Toronto, v. 1, 307-324.
- Brabb, E.E., Pampeyan, E.H. y Bonilla, M.G. (1972). Landslide susceptibility in San Mateo Country, California. US. Geol. Surv. Misc. Field Studies Map MF 360 scale 1:62.500.
- Brabb, E.E., Harrod, B.L. (1989). Landslides: Extent and economic significance: Proc., 28th International Geological Congress: Symposium on landslides, A.A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 385 p.
- Breña-Puyol, A., y Jacobo Villa, M.A. (2006). Principios y Fundamentos de la Hidrología Superficial. Universidad Autónoma Metropolitana Ciudad de México.
- Brizuela, A. B., Aguirre, C. A., y Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. *Teledetección*, 207-2014.
- Cano-Cruz. M (2007). *Evolución del volcán Hoya de Estrada*. (Tesis Maestría). Centro de Geociencias Campus Juriquilla, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Querétaro, 9-10.
- Cantú-Chapa, A. (1971). La serie Huasteca (Jurásico medio superior) del Centro –Este de México. *Revista del instituto Mexicano del Petróleo*, 3 (2), 17-40.
- Copons Llorens, R., y Tallada Masquef, A. (2009). Movimiento de ladera. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 284-294.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., y Dávila-Hernández, N., 20032. Fenómenos de remoción en masa en el poblado de Zapotitlán de Méndez, Puebla: relación entre litología y tipo de movimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(2), 95-106.
- Capra, L., Lugo-Hubp, J., y Zamorano-Orózcó, J. J. (2006). La importancia de la geología en el estudio de los procesos de remoción en masa: el caso de Totomoxtla, Sierra

Norte de Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LVIII (2), 205-214.

- Cardozo, C. P. (2013). *Zonación de susceptibilidad por procesos de remoción en masa en la cuenca del río Tartagal, Salta, Argentina*. (Tesis Maestría). Facultad de Matemáticas, Astronomía y Física, Instituto de altos estudios espaciales Mario Gulich, 18-64 p.
- Carrara, A., Cardinalli, M., Guzzetti, F., & Reichenbach P. (1995). GIS Technology in mapping landslide hazard. En: Carrara A, Guzzetti F (Eds.) *Geographical Information Systems in assessing natural hazards*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 135-175.
- Carrara, A., Guzzetti, F., Cardini, M., & Reichenbach, P. (1998). Current limitations in modeling landslide Hazard. En: Buccianti, A, Nardi, G., Potenza,R., (Eds.), *Proceedings of IAMG'98*, 195-203.
- Carrasco-Velázquez, B.E., Martínez-Hernández, E., y Ramírez-Arriaga, E. (2009). Estratigrafía de la formación El Morro del Paleoceno-Eoceno en Zimapán, Hidalgo. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61 (3) ,403-417.
- Carrillo-Bravo, J. (1961), Geología del Anticlinorio Huizachal-Peregrina al NW de Ciudad Victoria. *Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 13 (1-2), 1-98.
- Carrillo-Bravo, J. (1965), Estudio geológico de una parte del Anticlinorio de Huayacocotla. *Boletín Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 17(5-7), 73-96.
- Carrillo-Martínez, M. y Suter, M. (1991). Región de Zimapán, Hidalgo, Observación de un ejemplo de la técnica de la Sierra Madre Oriental. Universidad Nacional Autónoma de México, Inst. de Geología; Universidad Autónoma del estado de Hidalgo, Inst. de Investigación en Ciencias de la Tierra; Soc. Mex. de Mineralogía; Sría. de Educ. Publica; Subsría de Educ. Sup. E investigación científica, Conv. Sobre la Evol. Geol. de México y Congr. Mex. de Mineralogía, 1, Pachuca, Hgo. Mexico, Excur. Geol., 41p.
- Cartaya, S., Méndez, W., y Pacheco, H. (2006). Modelo de zonificación a los procesos de remoción en masa a través de un sistema de información geográfica. *Interciencia*, 31(9) ,638-646.
- Cartaya, S., Pacheco, H., y Méndez Williams. (2008). Metodología empleada para la zonificación de la susceptibilidad a los procesos de remoción en masa en cuencas de drenaje del estado de Vargas, Venezuela. *Revista de investigación*, 65, 162-180.
- Castellanos-Abella, E., y Van Westen, C. (2001). Landslide hazard assessment using the heuristic model. IV Taller Internacional de Ciencias de la Tierra y Medio Ambiente. La Habana, Cuba.
- Castelán-Vega, R., Tamariz Flores, V., Linares Fleites, G., y Cruz Montalvo, A. (2014). Agresividad de las precipitaciones en la subcuenca del río San Marcos, Puebla, México. *Investigaciones Geográficas, Instituto de Geografía, UNAM, México*, (83), 29-41.

- Castelán-Vega, R., Ruiz Careaga, J., Linares Fleites, G., Pérez Avilés, R., Tamariz Flores, V. (2007). Dinámica de cambio espacial-temporal de uso del suelo de la subcuenca del río San Marcos, Puebla México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía, UNAM*, (64) ,75-89.
- Castillo-Narravo, B.J. (2010). Análisis integral del riesgo a deslizamientos e inundaciones en la cuenca del río Cahoacán, Chiapas, México. (Tesis). Costa Rica, Centro Agronómico tropical de investigación y enseñanza. CIATIEC, 26-30p.
- Castillo-Román, J., López Salvador J., Hernández Juárez, J., y Nolasco Valencia, J. V., (2008). Caracterización geofísica del subsuelo y programa de estabilización del deslizamiento activo de Pahuatlán de Valle, Puebla. *Centro Universitario para la prevención de Desastres, BUAP*.
- CENAPRED (2001a). Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana.
- CENAPRED, (2001b). Inestabilidad de laderas. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México, serie: Fascículos México.
- CENAPRED, (2002). El clima en la inestabilidad de laderas “la época de lluvias”. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- CENAPRED, (2004). Guía Básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y Riesgos. Centro Nacional de Prevención de Desastres, serie: Atlas Nacional de Riesgo y Peligro.
- CENAPRED, (2006). Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligro y riesgos, Fenómenos Geológicos. Centro Nacional de Prevención de Desastres, serie: Atlas Nacional de Riesgos, México.
- Chacón, J. (1987). Geología y Riesgos Geológicos en el sector de Olivares (Moclín). Informe final Convenio Marco de Colaboración entre la Universidad de Granada y la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía; 133 pp.
- Chander, G., Markham, B. L., Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113,893-903.
- Chaves-Salas, I., Durán Monge, M., Tierra Herra, M., Soto Acosta, D. (2014). Susceptibilidad de deslizamiento del Cantón de Escazú mediante los métodos de Mora Vahrson (1992) y las modificaciones Mora eta al., (2002) y Camacho et al., (2004). *Revista En Tomo a la Prevención*, (13) ,7-13.
- Chung, C. & Fabbri, A. G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. *Natural Hazards*, 30,451-472.
- Chuvieco, E. (1990). Fundamentos de teledetección espacial. (2da. Edición). España Madrid: RIALP.
- CIAF, Centro de Investigación y Desarrollo de Información Geográfica. (2004). *Fundamentos de Sistemas de Información Geográfica*. Telecentro Regional en Tecnologías Geoespaciales. Bogotá, D.C.

- Copons-Llorens, R., y Tallada Masquet, A. (2009) movimientos de ladera. Enseñanzas de las Ciencias de la Tierra, 17(3), 284-297.
- Corominas, J. (1992). *Movimientos de ladera: predicción y medidas preventivas*. 1r congreso Iberoamericana sobre Técnicas aplicadas a la Gestión de emergencias para la reducción de Desastres Naturales, Valencia, 55-77.
- Cotler, H., y Priego, A. (2006). El análisis del paisaje como base para el manejo integrado de cuencas: el caso de la cuenca Lerma-Chapala. *El manejo integral de cuencas en México*, 79-89.
- Cruden, D., (1991). A simple definition of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43,27-29.
- Cuanalo-Campos, O.A., Oliva Gonzáles, A.O., y Gallardo Amaya, R. (2011). Inestabilidad de laderas influencia de la actividad humana. *Elementos*, 84,39-46.
- Cuanalo-Campos, A.O., Quezada, p., Aguilar M., Olivar R., y Barona, D. (2006). Sismos y lluvias, factores detonantes de deslizamientos de laderas en las regiones montañosas de Puebla, México. Red de revistas científicas de América Latina, el Caribe, España, y Portugal Sistema de información científica, núm. 4.
- Cuéllar Luna, L., Concepción Rojas, M., Ramírez, B., Álvarez Valdez, Á. M. y Díaz, C. (2009). Los sistemas de información geográfica y su empleo en un sistema de vigilancia integrado para la prevención del dengue en un municipio de ciudad de la Habana. *GeoFocus*, (9) ,166-183.
- Dai, F. C., & Lee C.F. (2002a). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology* 42 (3-4) ,213-228.
- Dai, F. C., Lee, C.F., & Ngai, Y. Y. (2002b). Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*, 64, (1), 65-87.
- De La Luz D'elia, A.R., (2011). *Análisis y definición de tipos de deslizamientos y sus zonas de susceptibilidad en la microcuencas el ventilador, Angangueo, Michoacán, México*. (Tesis Maestría). Facultad de ciencias Naturales. Universidad Autónoma de Querétaro.
- De la Llata Romero., R. Síntesis de la geología de México. Jornada Técnica: Túneles en México. Universidad Nacional Autónoma de México, 2011, p. 1-44.
- Delgadillo, A. y Paez, G. (2008). Aspectos hidrológicos, subcuencas susceptibles a crecidas, escenarios de riesgo por crecidas. En Ferrer, C. y Dugarte, M. (editores). Plan de desarrollo urbano del municipio Antonio Pinto Salinas bajo el enfoque de gestión de riesgo. Caracterización de la cuenca del valle de Macotíes, Merida. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)- Fundación para la prevención de los Riesgos del estado Mérida (FUNDAPRIS). Inédito.
- Díaz-Palacios, J., Chuquisengo, O., Ferradas, P. (2005). *Gestión de riesgo en los gobiernos locales*. Serie manuales N° 30. Lima, Perú.
- Eguiluz de Antuñano, S., Aranda-García, M., y Marrett, R. (2000). Tectónica de la Sierra Madre Oriental, México. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, LIII, 1-26.

- El Hamdouni, R. (2001). *Estudio de movimientos de ladera en la cuenca del río Ízbor mediante un SIG: contribución al conocimiento de la relación entre tectónica activa e inestabilidad de vertientes*. (Tesis Doctoral), Universidad de Granada. 429 pp.
- EPOCH (European Community Programme). (1993). Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community, Flegollet, J.C. (ed) 3 volumes.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard., C., Cascini. L., Leori, E. & Savage, W.Z. (2008). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102,85-98.
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea V. & Manea M. (2011). The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone. *ELSEVIER*, p.28.
- Ferrer, M., (1994). Inestabilidad de taludes y laderas: factores condicionantes y desencadenantes. Madrid. *Ingeopress*. 22, 20-25.
- Fernández, T. (2001). *Cartografía, análisis y modelado de la susceptibilidad a los movimientos de ladera en macizos rocosos mediante SIG: Aplicación a diversos sectores del sur de la provincia de Granada*. (Tesis Doctoral). Universidad de Granada. 648 pp.
- Flores-Lorenzo, P., y Alcántara Ayala, I. (2002). Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, núm. 49, pp. 7-26.
- Fuentes-Junco, J.J.A. (2004). Análisis morfométrico de cuencas: Caso de estudio del parque Nacional Pico de Tancítaro. Dirección General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología.
- García-Becerra, E., Valdivia Ornelas, L., Canchola Pantoja, Y. G., y Corona Morales, N. (2002). Resultados sobre el estudio de riesgos naturales Geológicos-Geomorfológicos en la colonia Nuevo Israel del municipio de Tonalá, Jalisco, México. (Resumen). Universidad de Guadalajara. Departamento de Geografía y Ordenación Territorial.
- García-López, S., Pinilla, C., Delgado J., y Cardenal, J. (2001). Corrección atmosférica de imágenes multiespectrales de satélites Morae mediante transformación A.C.P. *Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, 473-476.
- García-Rodríguez, M. J. (2008). *Metodologías para la evaluación de peligrosidad a los deslizamientos inducidos por terremotos*. (Tesis doctoral). Universidad de Alcalá. Departamento de Matemáticas. 217-229 pp.
- Gardiner, V. (1974). Drainage basin morphometry. British Geomorphological Research Group. Technical Bulletin N° 14. University of East Anglia. England .44p.
- Gardiner, V y Dackombe, R. (1983). *Geomorphological field manual*. George Allen & Unwin Publisher Ltd. London-UK. 254pp.

- Garrido-Carmona Bardomiano (29 de julio de 2010). Causan lluvias derrumbes en la sierra norte de Puebla; caminos afectados. Ruta
- Genaro-Zepeda (15 de junio de 2015). Derrumbe en Puebla deja siete comunidades incomunicadas. UnoTvNoticias
- Geomática (2013). Corrección Atmosférica (con ATCOR). (Reporte técnico). PCI Geomatics.
- Gladstone, B. (1999). Geological Hazards: Their assessment, avoidance and mitigation. F. G. Bell. E & FN Spon, London, 1999. £65 hardback; viii+648pp. ISBN 0-419-16970-9. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hidrology, 34,239.
- Gravelius, H. (1914). Flusskunde. Goschen Verlagshan dlug Berlin. En Zavoianu, I. (1985). Morphometry of Drainage Bassins. Ámsterdam, Elsevier. Rusia.
- Gómez-Ceballos, C., y Calderón Robles, D. (2012). *Estudio multitemporal con imágenes Landsat tm5 de la variación de la cobertura del suelo de la región circundante a una zona de Lahar Volcánico: Caso de estudio Volcán nevado de Ruiz (1985-2011)*. (Proyecto de grado).Universidad Militar Nueva Granada. Facultad de ingeniería.
- Gómez, H., Guerra, F., y González, J. (2003). Los Sistemas de Información Geográfica (SIGS) en la detección de áreas inestables. Geoenseñanza, Universidad los Andes, 8(001),33-48.
- Guzzetti, F., Galli M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., & Cardinalli, M. (2006). Landslide hazard assessment in the Collazzone area, Umbria, Central Italy. *Natural Hazards and Earth system Sciences*, 6,115-131.
- Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinalli, M., & Raichenbach, P. (1999). Landslide hazards evaluation: a review of current techniques and their applications in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology*, 31,181-216.
- Hernández-Madriral, V.M., Garduño Monroy., Alcántara Ayala. (2007). Estudio geológico para entender los procesos de remoción en masa en la región de Zacapoaxtla, Puebla, México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59 (2), 147-162.
- Hernández-Mena, Z. (2008). *Mapa de susceptibilidad a procesos de remoción en masa con base en análisis multivariado: La región de Zapotitlán de Méndez, Puebla*. (Tesis Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Highland, L.M., y Bobrowsky, Peter. (2008). Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes. Reston, Virginia, Circular 1325 del Sistema Geológico de los EUA, 5-33 p.
- Hinojosa-Corona, A., Rodríguez-Moreno, V.R., Munguía-Orozco, L. y Meillón-Menchaca, O. (2011). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 15-38.
- Hutchinson, J.N. (1988). General report morphological and geotechnical parameters of Landslides in relation to Geology and Hydrogeology. In Bonnard, C. (ed), Proceeding of the Fifth International Symposium on Landslides, A. A. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1,3-35.

- Horton, R. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*, 56, 275-370.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2012). shapefile de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). shapefile de clima. Escala 1:250 000.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aspectos Técnicos de las imágenes LANDSAT [Versión electrónica]. México: Dirección General de Geografía y Medio Ambiente. Recuperado el 11 de febrero de 2015 de: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/doc/aspectos_tecnicos_imagenes_landsat.pdf
- Irigaray, C. (1990). *Cartografía de Riesgos Geológicos asociados a movimientos de ladera en el sector de Colmenar (Málaga)*. (Tesis Licenciatura Inédito). Universidad de Granada, 390 pp.
- Irigaray, C., Lamas, F., El Hamdouni, R., Fernández, T. & Chacón, J. (2000). The importance of the Precipitation and the Susceptibility of the Slopes for the Triggering of Landslides Along the Roads. *Natural Hazards*, 21,65-81.
- Jiménez-Perálvarez, J.D. (2005). *Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de rules Granada*. (Memoria Doctoral). Departamento de ingeniería civil, Universidad de Granada.
- Lamolda-Ordóñez, H. (2008). Estudio de la influencia de las correcciones a imágenes Landsat ETM+ en la obtención de propiedades de cubiertas vegetales. (Tesis de Licenciatura). Universidad Politécnica de Madrid. 57-65 pp.
- Lee, S., & Evangelista D. G., (2008). Landslide Susceptibility Mapping using Probability and Statistics Models in Baguio City, Philippines. Department of Environment and Natural Resources, North Avenue, Diliman, Quezon City, Philippines. 12 pp.
- Linsley, R., Kohler, M. y Paulhus, J. (1977). *Hidrología para Ingenieros*. Mc Graw-Hill. New York, 386p.
- Liu, X.L., Yue, Z. Q., Tham, L. G., & Lee, C. F. (2004). Empirical assessment of debris flow risk on a regional scale in Yunnan province, southwestern China. *Environmental Management*, 30,249-64.
- López-Ramos, E. (1979). *Geología de México*, tomo II, (2da. ed.). México, D.F., 254 p.
- Lucini, P. (1973). The potential Landslides forecasting of the Argille Varicolori Scagliose complex in IGM 174 IV SE Map, Saviano di Puglia (Compania). *Geol. Appl. Idrogeol.* 8,311-316.
- Lugo-Hubp J., Vázquez C., T., Melgarejo P.G., García, F.J., Matías, G., 2001, Procesos gravitacionales en las montañas de Puebla: *Ciencia y Desarrollo*, 157, 25-33.

- Lugo-Hubp, J., Zamorano Orozco, J. J., Capra, L., Inbar, M. y Alcántara Ayala, I. (2005). Los procesos de remoción en masa en la Sierra Norte de Puebla, octubre de 1999: Causas y efectos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22 (2), 212-228.
- Martínez, G.J., y Balaguer Carmona, J. (1998). Litología, aprovechamiento de rocas industriales y riesgo de deslizamiento en la comunidad Valenciana. Publicaciones de Divulgación Técnica. Colección "Cartografía Temática", 5.
- Mantovani, F., Soeters. R. & van Western, C. J. (1996). Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology* 15,213-225.
- Mena-Frau, C., Molina Pino, L., Ormazábal Rojas, Y., y Hernández Morales., Y. (2011). Generalización de Modelo Digital de Elevación condicionada por puntos críticos de terreno [Abstract]. *Ciênc. Geod.*, sec. Artigos, Curitiba Abstract, 17 (3), 439-457.
- Méndez, W., y Marcucci, E. (2006). Análisis morfométrico de la microcuenca de la quebrada Curucutí, estado Vargas-Venezuela. *Revista Geográfica venezolana*, 47(1) ,29-55.
- Mora, S. y Vahrson W.G. (1994). Macrozonation methodology for landslide hazard determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologist*, XXXI, (1), 49-58.
- Mora, R., Vahrson, W. G. & Mora, S. (1992) Mapa de amenaza de deslizamientos, Valle Central, Costa Rica. Centro de Coordinación para la Prevención de Desastres Naturales en América Central (CEPRENAC).
- Mora-Chinchilla, R. (2004). *Evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento del cantón de San José, provincia de San José, costa rica*. Servicios Especializados de Laboratorio de Suelos y Rocas, Fundevi 0960. Sección Geotecnia e Hidrogeología, Escuela Centroamericana de Geología, Universidad de Costa Rica, 3-15.
- Mora, R., Chaves, J. y Vázquez, M. (2002). Zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento: resultados obtenidos para la Península de Papagayo mediante la modificación del método Mora & Vahrson (Mora et al., 1992). Memoria del tercer curso internacional sobre microzonificación y su aplicación en la mitigación de desastres. Lima, Perú. 30-46.
- Moreira-Muñoz, A. (1996). Los sistemas de información geográfica y sus aplicaciones en la conservación de la diversidad biológica. *Ambiente y desarrollo*, 12 (2), 80-86.
- Moreiras, S. M. (2005). Landslide susceptibility zonation in the Río Mendoza Valley, Argentina. *Geomorphology*, 66, 345-357.
- Moreiras, S. M. (2009). Análisis Estadístico Probabilístico de las variables que condicionan la inestabilidad de las laderas en los valles de los río Las Cuevas y Mendoza. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 65(4) ,780-790.
- Nagarajan, R., Mukherjee, R.A., Roy, A. & Khire, M.V. (1998). Temporal remote sensing data and GIS application in landslide hazard zonation of part of Western ghat, India", *International Journal of Remote Sensing* (19) ,573-585.

- Nilsen, T.H., Wright, R.H., Vlastic, T.C. & Spangle, V.E. (1979). Relative slope stability and land use planning in the San Francisco Bay Region California. *U.S. Geol.Survey.Prof. Paper* ,944,96.
- Nava, P. L., Alegría, L. M. A. (2001). *Los Sistemas Petroleros de la Región de Tampico – Misantla*. (Tesis de Licenciatura). México UNAM.
- Ochoa-Tejada, V., y François Parrot, J., (2007). Extracción automática de deslizamientos utilizando un modelo digital den terreno e imágenes de satélite de alta resolución IKONOS. Ejemplo de la Sierra Norte de Puebla, México. *Revista Mexicana de ciencias Geológicas*, 24, (3), 354-367.
- Oporto Gallardo, R.B. (2006). Estudios de fenómenos de remoción en masa. Sector Niebla-San Ignacio Comuna de Valdivia Xª Región. (Tesis de Licenciatura). Universidad Austral de Chile, Instituto de Obras Civiles.
- Programa Regional de Desarrollo, región Sierra Norte. (2011-2017).
- Programa de ordenamiento ecológico del territorio de la cuenca del río Tuxpan. (2009). Sección Puebla.
- Petróleos Mexicanos (PEMEX), 1988, Estratigrafía de la República Mexicana, Mesozoico: México, D.F., Subdirección de Producción Primaria, Coordinación ejecutiva de Exploración, Informe inédito, 216 p.
- Petroleros Mexicanos (PEMEX), 2013, *Provincia Petrolera Tampico-Misantla*.
- Paz-Tenorio, J.A. (2012). Laderas inestables y la construcción social del riesgo; tres casos en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. (Tesis Maestría). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.
- Paz-Tenorio, J.A., Gómez Ramírez, M., González Herrera, R. y Domínguez Salazar, F.F. (2011e). Los procesos de remoción en masa; génesis, efectos y limitaciones en el crecimiento urbano de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. *Revista Geográfica de América Central*. Número Especial EGAL 2011 Costa Rica. Segundo semestre 2011. Costa Rica. Julio.pp:1-18.
- Pernía, J.E., (1999). Sensores Espaciales para Estudios Ambientales, a las puertas del siglo XXI. *Forest. Venez*, 43(2) ,207-222.
- Ramírez Daza, H.M. (2013). *Imágenes multiespectrales de sensores remotos*. Guía número 3, United Nations Office for Outer Space Affairs, Santo Domingo, República Dominicana.
- Reuter, F. (2009). Plataformas Orbitales y sensores. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Nacional de Santiago del Estero. Serie Didáctica Núm. 34.
- Reyes-Chaves, J., Fernández Arce, M. (2014). Landslide Potential in Santo Domingo De Heredia, Costa Rica, Central América. *Jurnal of Geografy and Geology*, 6 (4), 1-11.
- Reyes, J., Fernández, M., Grineski, S., y Collins, T. (2014). Natural hazards in Santo Domingo de Heredia, Costa Rica, Central América. *Natural Science*, 6 (3) ,121-129.

- Roa, J.G. (2006). Aproximación al Mapa de Susceptibilidad Y Amenaza por Deslizamientos de la Ciudad de Trujillo, Venezuela. *Ágora- Trujillo, Venezuela*, 45-83.
- Roa, J. G. (2007). Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado Mérida-Venezuela. *Revista Geográfica venezolana*, 28, (2) ,183-219.
- Rodríguez-Solano, J.G., Quintana Cabeza, C.D., Rivera Alarcón, H.U. y Mosquera Tellez, J. (2013). Zonificación del peligro de remoción en masa en las zonas urbanas según método de análisis Mora y Vahrson: estudio de caso. *Revista ambiental Aire, Agua y Suelo*, 4, (1), 13-22.
- Rodríguez-Ortiz, J.M.,Hinojosa, J.A. & Prieto, C. (1978). Regional Studies on Mass Movements in Spain. Int. Ass. Eng. Geol. 3th International Congress, 1, 267-277.
- Salazar-Mondragón, L.G. (2007). Modelaje de la amenaza al deslizamiento mediante el sistema de información geográfica-ILWIS-, utilizando el método de Mora y Vahrson, 1991, Costa Rica.
- Sánchez-Julián (11 de Septiembre de 2014). La Pintada resucita, pero hay cicatrices. Universal.
- Schuster, R. L. (1996). Socioeconomic significance of landslides. In: A.K. Turner & R.L. Schuster (Eds) Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, 129-177.
- Segerstrom, K., (1956). Estratigrafía del Cenozoico entre México D. F. y Zimapán, Hidalgo: en XX Congreso Geológico Internacional, México, D.F: México, D.F., Excursiones A-14 y C-6, 323.
- Segerstrom, K., (1961). Geología del suroeste del Estado de Hidalgo y del noreste del Estado de México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, 13 (3 y 4), 147-168.
- Segura, G., Badilla, E., y Obando, L. (2011). Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres-Turrialba. *Revista Geológica de América Central*, 45,101-121.
- Servicio Geológico Mexicano. 1997. Carta geológico-minera Pachuca F14-11. Secretaria de Economía.
- Servicio Geológico Mexicano. 2004. Carta geológico-minera Poza Rica, F14-12. Secretaria de Economía.
- Sharpe, C:F:S, 1938. Landslides and related phenomena. Columbia University Press.
- Sidle R. C., & Ochiai H. 2006, Landslide Processes, Prediction, and Land use, Washington DC, American Geophysical Union, 1–312.

- Spiker, E.C. & Gori, P.L. (2000). *National Landslide Hazards Mitigation Strategy: a framework for loss reduction*. Department of Interior U.S.G.S.USA. Open-file report 00-450, 49.
- Spiker, E.C. & Gori, P.L. (2003). *National Landslide Hazards Mitigation Strategy: a framework for loss reduction*. Department of Interior, U.S.G.S. Reston, Virginia, USA. USGS Circular 1244, 56.
- Soeters, R., & Van Westen, C, J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. Landslides Investigation and Mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington, DC, USA. 129-177.
- Soriano-Franquet, D. S. (2009). Identificación y análisis de corrientes de derrubios en el macizo de Montserrat mediante Google Earth y SIG. (Tesina de Especialización). Universidad Politécnica de Cataluña, España. 205 pp.
- Strahler, A. (1974). Geografía física. Ediciones Omega, S.A. Barcelona, España. 765 pp.
- Suárez, A. M., Peraldo, G., Badilla, E. & Obando, L. (2009). Zonificación geomorfológica para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la Cuenca del río Viejo, Puriscal, Costa Rica. *Rev. Geológica de América Central*, 41, 55-69.
- Suárez, J., (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Colombia, 1-5.
- Suárez, A.M., Peraldo, G., Badilla, E. y Obando L.G. (2009). Zonificación geomorfológica para la elevación de la susceptibilidad a los deslizamientos en la cuenca del río viejo, Puriscal, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, 41, 55-69.
- Terremoto-Report.com. <http://es.earthquake-report.com/> visitado el 25-mayo-2015.
- TRAGSA. (1994) Restauración hidrológico forestal de las cuencas y control de erosión. Mundiprensa. Madrid, España: 901 p.
- Umaña Gómez, E., (2002). *Manejo de cuencas hidrográficas y protección de fuentes de agua*. (Curso de capacitación). Departamento de manejo cuencas y gestión ambiental. Universidad Nacional Agraria Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente.
- USGS. (2008). Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes. Reston, Virginia, Circular 1325 del Sistema Geológico de los EUA, 5-33 p.
- van-Zuidam, R.A. (1986). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Smits Publishers, The Hague. 442 pp.
- van-Westen, C.J. & Soeters, R. (2000). Remote Sensing and Geographic Information Systems for Natural Disaster Management. En: Roy, P., van Westen, C. J. and P. Champati Ray (Eds.): Natural Disasters and their mitigation. A Remote Sensing and GIS Perspective. Indian Institute of Remote Sensing. National Remote Sensing Agency, India: 31-76.

- van-Westen, C. J., Castellanos, E. & Kuriakose, S.L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard and vulnerability assessment: an overview. *Engineering Geology*, 102,112-131.
- van-Westen, C. J., Rengers, N., Terlien M. T., Soeters, R. (1997). Prediction of the occurrence of slope instability phenomena trough GIS-based hazard zonation. *Geologische Rundschau* 86 (2) ,404-414.
- Varnes, D.J. (1978).Slope Movement, types and Processes. *National Academy of Science, Washington*, 176,11-33.
- Varnes, D., 1984. Lanslide hazard zonation: review of principles and practice. *Natural Hazards*. UNESCO Press, 3, 63 p.
- Vega-Araya, E.E. y Vega Araya, M. A. (2005). *Vulnerabilidad ante desastres naturales. ¿Cómo actuar?* (Informe final) CIECO, 10-18.
- Vicens L. (2009). *Clasificación de Imágenes*. Programa UNIGIS de Postgrado y Master Internacional a distancia en Sistemas de Información Geográfica, UNIGIS Girona, Universidad de Girona, 15.
- Vílchez J., (2000). Evaluación de la exactitud de Modelos de Elevación Digital (MED) de malla regular generados a partir de curvas de nivel. *Geológica Venez*, 4(2), 239-259.
- Villacorta, S., Fidel, L., Y Zavala Carrión, B. (2012). Mapa de susceptibilidad por movimiento en masa de Perú. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69 (3) ,393 – 399.
- Von Humboldt, A. (2006). Los sistemas de información geográfica. *Geoenseñanza*, 11 (1) ,107-116.
- Zinck, J. A., López, J., Metternicht, G.I., Shrestha, D.P. & Vásquez-Selem, L. (2001). Mapping and modeling mass movements and gullies in mountainous areas using remote sensing and GIS techniques. *JAG: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 3 (1), 43-53.

Anexos

Imágenes y fotografías de los deslizamientos antiguos de la subcuenca San Marcos



Figura 1. Punto 3. Inestabilidad de ladera por cortes, ubicado en la localidad Mamaiquetla-Pahuatlan con coordenadas: 20°15'30.93"N 98°07'29.08"W.



Punto 6. Flujo de tierra, ubicado en el Cerro de Pericos, con coordenadas: 20°19'10.52"N 97°57'58.64"W.



Figura 3. Punto 7, flujo de detritos, ubicado al este de Tlacuilotepec con coordenadas: 20°19'36.46"N 98°02'40.37"W.



Figura 4. Punto 8-9. Deslizamiento de ladera, ubicada en la localidad de Coaxicala, con coordenadas: 20°14'00.47"N 98°01'38.45"W.



Figura 5. Punto 12. Deslizamiento de ladera, Carretera rumbo a Tlacruz-Pahuatlán- Cuaunetla-Tlacuilotepec, coordenadas: 20°17'51.41"N, 98°07'34.28"W.

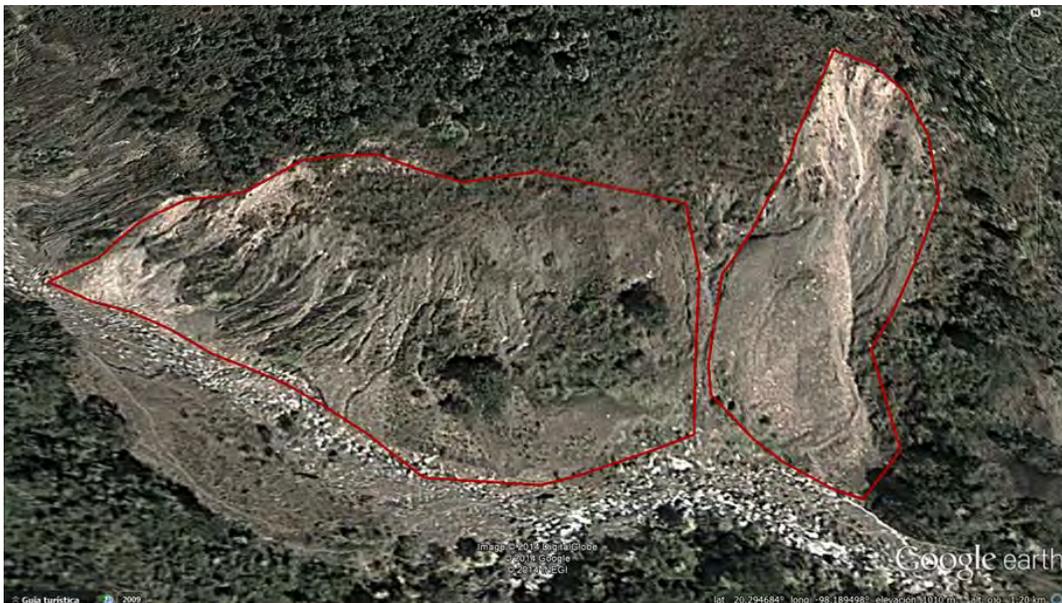


Figura 6. Punto 13. Deslizamiento de ladera ubicado al oeste de San Pablito con coordenadas: 20°17'42.69"N 98°11'24.20"W.



Figura 7. Punto 14. Deslizamiento de ladera ubicado al suroeste de Ozomatlán con coordenadas: $20^{\circ}16'28.16''N$ $98^{\circ}02'41.68''W$.



Figura 8. Punto1. Deslizamiento de ladera, ruta Tuxpan-Veracruz, coordenadas: $20^{\circ}19'51.79''N$ $97^{\circ}57'33.95''O$. Tomado por Sergio Arce (06-10-2014).

<http://www.panoramio.com/photo/114665616?source=wapi&referrer=kh.google.com> visitado el 12-mayo-2015.



Figura 9. Punto 2. Cortes de laderas, posible inestabilidad de taludes, ubicado al noreste de Tlapehuala, con coordenadas: $20^{\circ}19'3.50''N$ $98^{\circ}0'31.15''O$. Tomado por JRW&P (20-02-2010)

<http://www.panoramio.com/photo/32409627?source=wapi&referrer=kh.google.com> visitado el 12-mayo-2015.



Figura 10. Punto 3. Se observan laderas sin vegetación, posibles movimientos, ruta Tlacuilotepec, coordenadas $20^{\circ}19'48.52''N$ $98^{\circ}3'9.24''O$. Tomado por xondorfly (20-02-2011).

<http://www.panoramio.com/photo/87148591?source=wapi&referrer=kh.google.com> visitado el 12-mayo-2012.



Figura 11. Punto 4. Se observa un deslizamiento de ladera, Carretera rumbo a Tlalacruz, coordenadas: 20°17'37.09"N 98° 7'33.30"O. Tomada por Guillermo Cercaño (13-03-2011).

<http://www.panoramio.com/photo/60338333?source=wapi&referrer=kh.google.com> visitado el 12-mayo-2012.





Figura 12, 13, 14. Punto 5. Deslizamiento de laderas que afectó viviendas en la calle 5 de Mayo, Pahuatlán, reportado en Octubre 2007 en la página Tulancingo cultural y en septiembre de 2013, por Ánimas Vargas, con coordenadas $20^{\circ}16'35.13''N$ $98^{\circ}9'1.56''$

<http://www.tulancingocultural.cc/sociologia/pahuatlan/pahuatlanenriesgo/index.htm>, visitado el 2-mayo-2015.



Figura 15. Punto 6. Deslizamiento de una ladera ubicado en Cerro de los Pericos, al norte de Xicotepéc de Juárez, con coordenadas: $20^{\circ}19'5.17''N$ $97^{\circ}58'24.15''O$. Tomado por Larry B.J. (26-04-2013).

<http://www.panoramio.com/photo/112379230?source=wapi&referrer=kh.google.com> visitado el 12-mayo-2015.



Figura 16. Punto 7. Deslizamiento de ladera ubicado en Rio Tlacuilo, al Oeste de Tlapehuala, coordenada: 20°18'58.01"N 98° 2'35.50"O. Tomado por Ángel en (22-03-2008).

<http://www.panoramio.com/photo/28518714> visitado el 12- mayo-2015



Figura 17. Punto 8. Deslizamiento de ladera en Pahuatlán del Valle. Coordenadas: 20° 17' 6.59" N 98° 8' 17.08" W. Tomado por Gerardo Perea Nieto (11-07-2007).

<http://mw2.google.com/mw-panoramio/photos/medium/3530653.jpg> visitado el 12-mayo-2015.

Fotografías de las zonas planicies de la subcuenca San Marcos



Figura 18. Punto 1. Relieve al norte de Chicualoque, Veracruz, coordenadas: 20°23'41.52"N 97°40'10.98"O. tomado por Leo Vásquez (08-02-2007).

<http://www.panoramio.com/photo/1383249?source=wapi&referrer=kh.google.com> visitado el 15-mayo-2015.



Figura 19. Punto 3. Col. Arroyo Florido, Veracruz, coordenadas 20°24'22.53"N97°30'38.50"O. Tomado por Enrique Cuevas (27-05-2013).

http://www.panoramio.com/photo_explorer#view=photo&position=11&with_photo_id=91227801&order=date_desc&user=2818465 visitado el 15-mayo-2015.



Figura 20. Punto 4. Coatzintla, Veracruz, con coordenadas: $20^{\circ}29'15.86''\text{N}$ $97^{\circ}29'39.36''\text{O}$.
tomado por Orlando-Ska. (29-03-2013)

http://www.panoramio.com/photo_explorer#user=3782105&with_photo_id=88013347&order=date_desc visitado el 15-mayo-2015.



Figura 21. Punto 5. Al sur de la Col. Palma Sola, Veracruz, coordenadas $20^{\circ}24'33.37''\text{N}$ $97^{\circ}33'38.14''\text{O}$. tomado por liamgg (29-07-2010).

<http://www.panoramio.com/photo/38844227?source=wapi&referrer=kh.google.com> visitado el 15-mayo 2015



Figura 22. Punto 6. Al noreste de Progreso, Puebla, coordenadas: $20^{\circ}27'51.85''\text{N}$ $97^{\circ}47'58.62''\text{O}$
tomado por miguelangelsv (09-07-2011)

http://www.panoramio.com/photo_explorer#user=7631887&with_photo_id=89235926&order=date_desc visitado el 15-mayo-2015



Figura 23. Punto 7. Al este de Santa Rita, Xicotepéc de Juárez, Puebla, coordenadas: 20°22'1.17"N 97°45'47.64"O. Tomado por Gabriel_lopez Taken on (28-03-2005)

http://www.panoramio.com/photo_explorer#user=6793919&with_photo_id=85083720&order=date_desc visitado 15-mayo-2015



Figura 24. Punto 7. Al este de Santa Rita, Xicotepéc de Juárez, Puebla, coordenadas: 20°22'1.17"N 97°45'47.64"O. Tomado por Gabriel_lopez Taken (28-03-2015)

http://www.panoramio.com/photo_explorer#user=6793919&with_photo_id=85083779&order=date_desc visitado el 15-mayo-2015.



Figura 25 .Genaro Zepeda (15/06/2015). Caídas de rocas en la carretera Pezmatlán-Mazatepec, dejando incomunicadas siete localidades en la zona de Tlatlauquitepec, ubicada en la Sierra Norte de Puebla.

<http://www.unotv.com/noticias/estados/oriente/derrumbe-en-puebla-deja-siete-comunidades-incomunicadas-494518/>