



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS
Colegio de Geografía

Modelo cuantitativo para inestabilidad de
laderas en un ambiente SIG, aplicado en
la Sierra Norte de Chiapas.

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:
ITCHEL CARMEN PEÑA REYES



DIRECTOR DE TESIS:
Dr. Roberto Bonifaz Alfonzo

Ciudad Universitaria, México, Enero 2013



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

Introducción	1
1. Zona de estudio. Aspectos Físicos y Socioeconómicos.	6
1.1 Localización	6
1.2 Aspectos Físicos	7
1.2.1 Clima	7
1.2.2 Relieve	9
1.2.3 Geología	10
1.2.4 Vegetación	11
1.3 Aspectos Socioeconómicos.	12
1.3.1 Población	12
1.3.2 Actividades Económicas	14
1.4 Problemática	14
2. Sistemas de Información Geográfica y Modelos Digitales de Elevación	18
2.1 Sistemas de Información Geográfica.	18
2.1.1 Antecedentes.	18
2.1.2 Concepto, Estructura y Capacidades de los SIG.	23
2.1.2.1 Concepto	23
2.1.2.2 Estructura y Capacidades	25
2.1.3 Uso de SIG en el Modelamiento de zonas con riesgo de presentar deslizamientos ...	30
2.2 Modelos Digitales de Elevación	31
2.2.1 Conceptos: MDE y MDT	31
2.2.2 Estructura y Construcción	34

2.2.3 Derivación de variables	38
3. Modelo de susceptibilidad de Laderas a presentar Deslizamientos	45
3.1 Deslizamientos	45
3.2 Factores Causales	47
3.2.1 Pendiente	49
3.2.2 Geología	51
3.2.3 Curvatura	52
3.2.4 Aspecto	54
3.2.5 Uso de suelo y Vegetación	56
3.3 Modelo para la determinación de zonas propensas a sufrir deslizamientos.	57
3.3.1 Metodología	57
3.3.2 Modelo de Susceptibilidad	59
3.3.2.1 Mapas Base	62
3.3.3 Desarrollo del Modelo	66
3.3.3.1 Pendientes	68
3.3.3.2 Curvatura	70
3.3.3.3 Aspecto	72
3.3.3.4 Geología y NDVI	74
3.3.3.5 Análisis Estadístico. Inventario de deslizamientos y Factores causales.	75
3.3.3.6 Reclasificación y Ponderación	77
4. Resultados y Discusión	87
4.1 Resultados	87
4.1.1 Pendientes Ponderadas	88

4.1.2	Curvaturas Ponderadas	92
4.1.3	Aspecto Ponderado	95
4.1.4	Geología Ponderada	99
4.1.5	NDVI Ponderado	103
4.2	Discusión	106
4.3	Mapa de Susceptibilidad	110
	Conclusiones y comentarios finales.	115
	Referencias	118

Índice de Tablas y Figuras

Figura 1. Zona de Estudio. Elaboración propia.....	6
Figura 2. Climas de Chiapas. Fuente INEGI	8
Figura 3. Vegetación de Chiapas. Fuente: Ramírez (2000).	12
Figura 4. Aspecto de la comunidad Reforma y Planada, una de las zonas afectadas.....	17
Figura 5. Sistema SIG. Elaboración Propia. Fuente internet.	24
Figura 6. Subsistema de Entrada de Datos.....	26
Figura 7. Subsistema de Almacenamiento de Datos	27
Figura 8. Subsistema de Manejo de Datos.....	28
Figura 9. Subsistema de Visualización.	28
Figura 10. a) Matriz de alturas: estructura Raster, b) Estructura de Triángulos Irregulares.	35
Figura 11. Diagrama de generación de un MDE y obtención de variables.	40
Figura 12. Esquema de desplazamiento de una submalla de 3x3.....	41
Figura 13. Curvatura	44
Figura 14. Diagrama de Flujo de la Metodología.....	60
Figura 15. Modelo de Susceptibilidad a Deslizamientos.	61
Figura 16. Modelo Digital de Elevación mostrando la hipsometría de la zona de estudio	63
Figura 17. Mapa Geológico de la zona de estudio sobrepuesto al modelo sombreado. Fuente INEGI	64
Figura 18. Índice de Vegetación Normalizado de la zona de estudio.	66
Figura 19. Obtención del MDE filtrado.	67
Figura 20. Modelo Digital de Elevación filtrado.....	68
Figura 21. Obtención de la Pendiente dentro del Modelo.	69
Figura 22. Mapa de Pendientes.	69
Figura 23. Obtención de la Curvatura dentro del modelo. Primer paso.	70
Figura 24. Obtención de la Curvatura final (Curvatura2) dentro del modelo.	71
Figura 25. Mapa de Curvaturas.....	72
Figura 26. Obtención del Aspecto dentro del Modelo.	73
Figura 27. Mapa de Aspecto.....	73

Figura 28. Incorporación de la Geología y el NDVI al Modelo.....	74
Figura 29. Obtención de Pendientes Ponderadas dentro del Modelo.	78
Figura 30. Obtención de Curvaturas Ponderadas dentro del Modelo.....	80
Figura 31. Obtención de Aspectos Ponderados dentro del Modelo.....	81
Figura 32. Obtención de Litologías Ponderadas dentro del Modelo.	82
Figura 33. Obtención del NDVI Ponderado dentro del Modelo.....	84
Figura 34. Ponderación de Factores y Suma Ponderada.....	86
Figura 35. Mapa de Pendientes Ponderadas.....	88
Figura 36. Histograma de Frecuencias de las Pendientes Ponderadas.....	89
Figura 37. Mapa de Curvaturas Ponderadas.	92
Figura 38. Histograma de Frecuencias de las Curvaturas Ponderadas.....	93
Figura 39. Mapa de Aspecto Ponderado.....	96
Figura 40. Histograma de Frecuencias de los Aspectos Ponderados.....	97
Figura 41. Mapa de Geología Ponderada.....	100
Figura 42. Histograma de Frecuencias de las Geologías Ponderadas.	101
Figura 43. Mapa del NDVI Ponderado.....	103
Figura 44. Histograma de Frecuencias del NDVI Ponderado.....	104
Figura 45. Susceptibilidad al Deslizamiento.....	111
Figura 46. Mapa Final de Susceptibilidad al deslizamiento, indicando los niveles de susceptibilidad.....	113
Tabla 1. Población por municipios.....	13
Tabla 2. Ponderación Pendientes.....	79
Tabla 3. Ponderación Curvaturas.....	80
Tabla 4. Ponderación Aspecto.....	81
Tabla 5. Ponderación Geología.....	83
Tabla 6. Ponderación NDVI.....	84
Tabla 7. Ponderación de Factores Causales.....	87

Dedicatoria

A la mujer que me enseñó el valor de la responsabilidad, del trabajo arduo, de la perseverancia, entre muchísimas cosas más, a la mujer que me transmitió su pasión por la Geografía y que me enseñó lo divertido e interesante que es. A la mujer que lo dio todo por mis hermanos y por mí, a la mujer entera que jamás se dobló, pero sobre todo a la mujer que me dio la vida y que en todo momento malo me levanto y estuvo a mi lado. A esa gran mujer, Camelia Reyes Vázquez, mi madre, le dedico el esfuerzo entero de mi trabajo.

Al hombre que me enseñó y me educó en la formalidad, el compromiso, y el respeto. Al hombre ingenioso y detallista, al hombre pulcro, elegante y de presencia. Al hombre que me enseñó miles de cosas y alentó en mi la curiosidad y el deseo del siempre querer aprender algo nuevo. A mi padre, Pablo Peña González, con cariño esta tesis.

A mis abuelitos: Miguel Reyes Sánchez y Carmen Vázquez Pompa. Mis segundos padres, ejemplo de trabajo, empeño, esfuerzo, compromiso y rectitud. Por darle alegría y sensatez a mi vida. Con todo mi amor y mi agradecimiento este trabajo arduo.

A mis hermanitos “los muéganos”, Pablo, Yolo, y Adiel, por ser compañeros de aventura, travesuras, viajes, peleas, locuras, porque sé que siempre han estado, están y estarán ahí, por la alegría que me transmiten, por provocarme un sinfín de risas, por compartir tantos recuerdos y tantos proyectos. Con toda la felicidad y el amor del mundo, el esfuerzo de ésta tesis a su salud.

A la mujer que comparte su vida conmigo, a la mujer que tiene una paciencia a prueba de todo, que me comprende y que me cuida. A la mujer que también se ha desvelado y me ha apoyado. A la mujer que simplemente me ama y a la que amo. A ti Ale, con mucho muchísimo amor.

A esa pequeñita que ha llegado a darle alegría y sentimiento a mi vida. Traviesa, inteligente, juguetona y locochona, a ti pequeña Viri. Al bebesito que esta apunto de arribar, por la ilusión y la emoción que representas para la familia, con amor a estos dos chiquitos.

Agradecimientos

A mi alma mater la Universidad Nacional Autónoma de México, por ser parte medular en mi formación profesional y personal, por impregnar mi vida de una fuerte pasión por la institución y por todos los valores y enseñanzas que en ella se promueven. Por ser casa abierta.

A mi asesor y amigo, Roberto Bonifaz Alfonzo, por llevarme siempre al límite del límite del límite, por propiciar tantos cambios positivos en mí persona, por contagiarme de esa incansable curiosidad y motivarme a siempre preguntar ¿Por qué?, por estar ahí en los momentos más aciagos y difíciles de mi vida. Gracias Doc.

A mi Sínodo: Mary Frances Rodriguez, Lorenzo Vázquez Selem, José Gasca y Eduardo Pérez Torres. Por el tiempo y el interés dedicado a la revisión de este trabajo por sus acertados comentarios y el enriquecimiento de este trabajo con sus valiosas aportaciones. Mil gracias por el apoyo.

A mis profesores de la Facultad que dejaron huella en mi vida por sus enseñanzas y su pasión por la Geografía, y que me tendieron la mano en momentos difíciles: Carmen Sámano Pineda, Carmen Juárez Gutiérrez, Jorge Enríquez, Tobyanne Berenberg Martin, Eduardo Pérez Torres, José Gasca Zamora, Francisco Hernández, Sergio Yussim.

A mis amigos: Mónica, Pako, Paulina, y Sara, compañeros en las buenas y en las malas, en los dieces y en los seises, en las buenas y en las malas prácticas, en las buenas y en las malas fiestas. Por su paciencia, por guardar tantos secretos, por compartir no solo clases sino la vida misma. Por seguir aquí.

A José Gasca Zamora, por el apoyo incondicional que me ha brindado en lo profesional y en lo personal, buen maestro y gran amigo.

A Juan Manuel Dávila, por ser un gran y buen amigo, compañero de trabajo, caballero y camarada, por compartir atardeceres y amaneceres trabajando, haciendo del esfuerzo algo divertido.

Introducción

En años recientes, el crecimiento de la población y la expansión de los asentamientos sobre áreas peligrosas han propiciado un gran incremento en el impacto de los desastres asociados a fenómenos naturales tanto en los países industrializados como en los países en desarrollo. Los países en desarrollo tienen enormes dificultades para reunir los altos costos del control de peligros naturales a través de obras mayores de ingeniería y técnicas de uso de suelo racionales. El objetivo hoy en día es implementar sistemas de advertencia y regulaciones en la utilización de la tierra dirigidos a minimizar la pérdida de vidas y propiedades, sin invertir en proyectos costosos y a largo plazo (Guzzetti, F., et al., 1999).

Los procesos de remoción en masa constituyen una amenaza importante para la sociedad, ya que estos, en combinación con la vulnerabilidad de las poblaciones expuestas, determinan el riesgo y han causado a lo largo de la historia un considerable número de desastres en diversas partes del mundo, incluyendo México. Los deslizamientos causan severos impactos a la población, las propiedades y las instalaciones, y estas pérdidas se espera que incrementen debido a la presión de las poblaciones que se expanden hacia áreas de laderas inestables.

El daño o vulnerabilidad está más centrado en desastres a gran escala, tales como los huracanes y terremotos, y únicamente unos pocos se relacionan con movimientos en masa (Petrucci, O., y Gullà, G., 2010), sin embargo, los deslizamientos deben ser un asunto de preocupación mayor, ya que son los mayores peligros geológicos naturales y cada año son responsables de enormes daños a la propiedad, pérdidas de vidas humanas y afectaciones económicas, involucrando costos tanto directos como indirectos.

Incluso, en muchos países, las pérdidas económicas y las víctimas debido a los deslizamientos son más grandes que las comúnmente reconocidas y generan pérdidas anuales más grandes que las provenientes de cualquier otro desastre natural, incluyendo terremotos, inundaciones y huracanes. (Pradhan, B., 2010; Krejčí, O., et al. 2002)

Actualmente una extensiva búsqueda es llevada a cabo para encontrar la localización más apropiada para los asentamientos. Uno de los más importantes parámetros que deben ser tomados en cuenta es el riesgo a los peligros naturales (Yalcin, A. y Bulut, F., 2007). Los modelos predictivos de deslizamientos a nivel regional generalmente intentan identificar dónde pueden ocurrir deslizamientos en una región dada, con base en un conjunto de características ambientales relevantes. Estos modelos proveen información de laderas potencialmente inestables poco aptas para la construcción. (Guzzetti, F., et al., 1999). En ese sentido una caracterización detallada de los deslizamientos desde una perspectiva de detección automática es requerida, pues la extracción de resultados rápidos y exactos ayudaran a los planificadores a implementar mejores estrategias de manejo del suelo (Tapas, M., et al. 2010). Así pues, la evaluación de susceptibilidad al deslizamiento, puede mejorar notablemente la planeación del uso de suelo y por lo tanto puede ser considerada una forma eficiente para reducir daños futuros y pérdidas de vidas causados por deslizamientos. (Cascini, L., 2008)

Herramientas para manipular y analizar datos espaciales tales como los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden facilitar la aplicación de técnicas cuantitativas en la evaluación y mapeo de susceptibilidad a deslizamientos. El procesamiento electrónico de los datos geográficos está llegando a ser una herramienta común en un amplio rango de actividades de investigación relacionadas con la evaluación y control de deslizamientos u otras

catástrofes naturales (Guzzetti, F., 1999). Así mismo, se ha demostrado que los SIG pueden jugar un rol invaluable en la evaluación de la inestabilidad de laderas, debido a que la colección, manipulación y análisis de datos ambientales puede ser mucho más eficiente y de bajo costo aplicando técnicas SIG (Carrara, A., et al., 1999).

La inestabilidad de laderas se puede considerar como una de las amenazas de origen natural más importantes en México (Alcántara, I., y Murillo, F., 2008). De manera particular, en algunas porciones de la Sierra Norte de Chiapas el alto número de deslizamientos registrados, debido a la topografía accidentada, la variedad de litologías, usos de suelo y vegetación, sugiere la fuerte necesidad de realizar evaluaciones de susceptibilidad al deslizamiento, por lo que en el presente trabajo una metodología cuantitativa para la zonificación de la susceptibilidad al deslizamiento es descrita y su aplicación al área de estudio, es presentada. Así pues, el objetivo principal de este trabajo fue la creación de un mapa de susceptibilidad al deslizamiento (hablando de manera genérica), en una porción de la Sierra Norte de Chiapas, obtenido a partir del desarrollo de un modelo basado en las interrelaciones entre los factores espaciales que conjuntamente influyen la ocurrencia de deslizamientos, utilizando como plataforma un SIG. Los criterios para seleccionar la zona de estudio fueron en primera instancia, la considerable cantidad de deslizamientos que se han verificado y reconocido en los últimos años con repercusiones severas en la población, además de la disponibilidad de información sobre aspectos temáticos de la región.

En este trabajo, Model Builder de ArcGIS (ESRI) © ha sido aplicado para el análisis de la susceptibilidad al deslizamiento, así como para el desarrollo de un modelo que determine de manera automática las zonas más propensas a presentar deslizamientos.

El modelo, que se encuentra disponible para descargarse directamente como una herramienta ArcGIS, permite que la susceptibilidad sea calculada en una región dada, proporcionando un mapa de susceptibilidad al deslizamiento. En este trabajo se detallan los pasos necesarios para el procesamiento de dicho Modelo, permitiendo a las personas interesadas construir su propio modelo y familiarizarse con la herramienta. En el mapa de susceptibilidad al deslizamiento resultante una zonificación progresiva de las áreas o pendientes propensas al deslizamiento fue construida.

Así mismo, la metodología desarrollada en el presente trabajo para la determinación de la susceptibilidad a deslizamientos permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a deslizarse, mediante la combinación de la valoración y peso relativo de diversos indicadores, la cual es sencilla de implementar en un SIG. La metodología es simple, fácilmente recordada y entendible; cada uno de sus factores es claro y la terminología es ampliamente aceptada; incluye los factores más significativos desde el punto de vista de la inestabilidad de laderas; se basa en parámetros que pueden determinarse de manera rápida y barata, así como, en valoraciones que incluyen el peso relativo de los parámetros.

De igual manera, los mapas generados con esta metodología se pueden utilizar y aplicar como instrumentos en la toma de decisiones para los procesos planificación del uso del terreno, explotación de recursos naturales y el desarrollo de infraestructura, urbanismo y líneas vitales. El resultado de su aplicación será una mejor comprensión de los fenómenos naturales en el área de estudio, lo cual puede incidir en su desarrollo eficiente y duradero. La metodología permite desarrollar una aproximación del grado de susceptibilidad al deslizamiento de la región estudiada y de los fenómenos que influyen mayormente esta condición.

Es valiosa en la identificación de áreas críticas y útil en la orientación de prioridades en cuanto al destino de los recursos designados hacia estudios geotécnicos de detalle. Cabe señalar que bajo ninguna circunstancia, ésta metodología debe sustituir los estudios geotécnicos de campo y laboratorio, necesarios para el diseño y concepción de las obras civiles y sus complementos de protección y mitigación correspondientes. Adicionalmente, fuera de un concepto general, la metodología tampoco es capaz de pronosticar el tipo de deslizamiento que podría presentarse.

Es importante señalar que una vez identificada la susceptibilidad al deslizamiento se pueden desarrollar los proyectos de inversión pertinentes que eviten, prevengan o mitiguen su efecto. Así mismo, los resultados pueden ser usados como datos básicos para el manejo de pendientes y la planeación del uso de suelo.

1 Zona de estudio. Aspectos Físicos y Socioeconómicos.

1.1 Localización

La zona de estudio se localiza en el estado de Chiapas, y corresponde a una porción de la región Norte, misma que queda enmarcada en las provincias fisiográficas de Montañas del Norte de Chiapas, Altos de Chiapas y Llanura costera del Golfo de México. Sus coordenadas extremas son: 16°59'47.23" y 17°32'48.0" de Latitud Norte, 92°34'11.32" y 93°23'24.68" de Longitud Oeste (Figura 1).

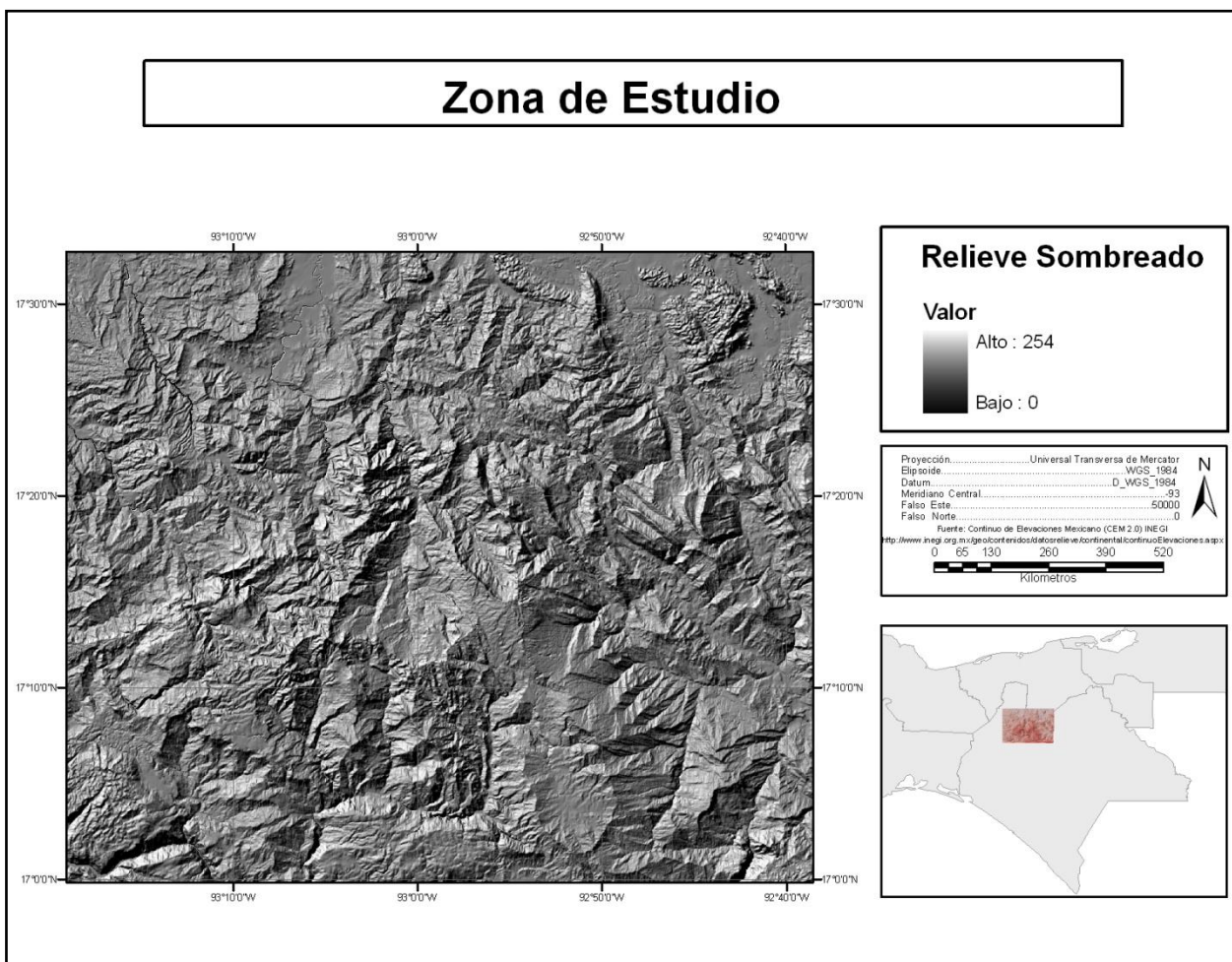


Figura 1. Zona de Estudio. Elaboración propia.

El criterio para delimitar el área de estudio fue en primera instancia abarcar sectores donde se han presentado deslizamientos con anterioridad, así como zonas donde por las características del relieve se podría esperar la presencia de deslizamientos, en segundo lugar fue considerar los recursos y las fuentes de información, tanto cartográficas como bibliográficas, disponibles. De ésta manera, la región bajo estudio comprende una parte o la totalidad de la extensión de los siguientes municipios: Jitotol, Simojovel, Huitiupán, Pueblo Nuevo Solistahuacan, Ixtacomitán, Ostuacán, Pichucalco, Amatán, Ixhuatán, Pantepec, Solosuchiapa, Chapultenango, Ocotepec, Tapalapa, Tapilula, Rayón, Coapilla, Copainalá, El Bosque, y Sunuapa.

1.2 Aspectos Físicos

1.2.1 Clima

De acuerdo con información extraída de la página Perfiles Municipales creada por la Dirección de Geografía, Estadística e Información de la Subsecretaría de Planeación, Presupuesto y Egresos que pertenece a la Secretaría de Hacienda del Estado de Chiapas, y a partir de la confrontación de dicha información con la obtenida de otras fuentes como el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (<http://mapserver.inegi.gob.mx/geografia/espanol/estados/chis/climas.cfm?c=444&e=07>) y La Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>), se encontró que, los principales climas que se distribuyen en los municipios que conforman la zona de estudio son, en orden de predominancia, los siguientes: Cálido húmedo con lluvias todo el año, Cálido húmedo con abundantes lluvias en Verano, Semicálido húmedo con lluvias todo el año, y Cálido subhúmedo con lluvias en verano.

La diversidad climática de la zona bajo estudio descrita anteriormente se puede apreciar en la Figura 2.



Figura 2. Climas de Chiapas. Fuente INEGI

Conforme a los tipos de clima que se encuentran en la región bajo estudio, las temperaturas presentes en el periodo de Mayo a Octubre van de un mínimo de 9°C a 18°C, a un máximo de

18°C a 34.5°C, mientras que para el periodo de Noviembre a Abril las temperaturas mínimas registradas oscilan entre 6°C y 15°C, y las máximas entre 15°C y 30°C.

Por otro lado, en cuestión al régimen pluviométrico de la zona de estudio, este puede variar para el periodo Mayo-Octubre de un mínimo de 900 mm., a un máximo de 3000 mm.; en contraposición de las cantidades esperadas para el periodo Noviembre-Abril, que van de 75 mm., como mínimo hasta 2000 mm., como nivel máximo.

1.2.2 Relieve

En lo que respecta al relieve, como se mencionó con anterioridad, la zona de estudio se extiende a lo largo de las regiones fisiográficas de Montañas del Norte de Chiapas, Altos de Chiapas y Llanura costera del Golfo de México. Según Ortega et al (1992), la zona se encuentra localizada desde el punto de vista estructurotectónico, en las provincias geológicas: Cuenca deltaica de Tabasco y Cinturón Chiapaneco de pliegues y Fallas, que se encuentra conformado por la provincia tectónica de Simojovel.

Para esta región, de acuerdo con Santana et al, 2012, las estructuras de plegamiento laramídico, conjuntamente con el fracturamiento neotectónico, tanto de desplazamientos transcurrentes como verticales, sus ascensos diferenciados en el territorio, y la actividad volcano-tectónica reciente, han determinado la diferenciación del relieve, formando y consolidando los escalones del relieve actual: montañas bajas, premontañas, lomeríos, y llanuras.

Debido a lo anterior los rasgos del relieve que predominan son terrenos montañosos, accidentados y pedregosos, propios de las Sierras altas escarpadas complejas, intercalados

con lomeríos, valles intermontanos, valles aluviales, y explanadas en las que en ocasiones rematan los terrenos montañosos. Por otro lado, en la pequeña porción de la zona de estudio que pertenece a la Llanura Costera del Golfo, el relieve está constituido de terrenos planos y algunos lomeríos.

1.2.3 Geología

La superficie que comprende el área de estudio, forma parte de la región sureste de la República mexicana, la cual de acuerdo con Padilla y Sánchez (2007) es una de las áreas más complejas de Norteamérica desde el punto de vista geológico. Esta complejidad se debe a que los movimientos de las placas tectónicas norteamericana, del Caribe y de Cocos, convergen en esa región. (Morán-Zenteno, D. et al., 2000). Así mismo, la compleja evolución geológico-geomorfológica de la zona, está caracterizada por el emplazamiento de antiguas estructuras de plegamiento, correspondientes a la Orogenia Laramide, por la actividad de los movimientos neotectónicos, por la actividad volcano-tectónica reciente del Chichón; así como por la intensidad de los procesos del modelado exógeno, en condiciones de trópico húmedo y de un substrato litológico diferenciado. (Hernández, et al, 2009; Bollo y Santana, 2008)

En general, como se ha venido describiendo, la constitución geológica del área de estudio refleja diferentes eventos durante la evolución geotectónica regional, como son una gran acumulación de sedimentos marinos, la existencia de fuertes deformaciones plicativas y disyuntivas, y actividad volcánica en determinadas épocas, incluso hasta el presente (Ortiz, et al, 2007; Santana, 2012). De acuerdo con todo lo anterior la constitución geológica de la zona de trabajo abarca una gran gama de complejos petromórficos, tales como complejos

carbonatados, calcáreos, terrígenos, volcánicos y acumulativos fluviales, compuestos básicamente por rocas ígneas y sedimentarias (Hernández, 2009).

1.2.4 Vegetación

La vegetación natural de la zona de estudio está constituida principalmente por poblaciones de Bosque mesófilo de montaña, Bosque de coníferas, Bosque de pino, Bosque de encino, Bosque mixto, Selva alta perennifolia, y Selva mediana; mientras que la vegetación inducida corresponde a pastizal y agricultura de temporal con el Maíz, Frijol, Café, Plátano, y Mango, como principales cultivos (SHCP Chiapas, 2011; INEGI, 2011),

La distribución de la vegetación se puede observar en la imagen de la Figura 3. Cabe señalar que la superficie cubierta por vegetación natural en los municipios que integran la zona de estudio existe en mucha menor proporción que las superficies ocupadas por vegetación inducida (Pastos y Cultivos), y por espacios poblados. Lo que en sí mismo constituye un riesgo, ya que la ausencia de vegetación por los cambios en el uso de suelo son considerados como uno de los principales disparadores de deslizamientos.

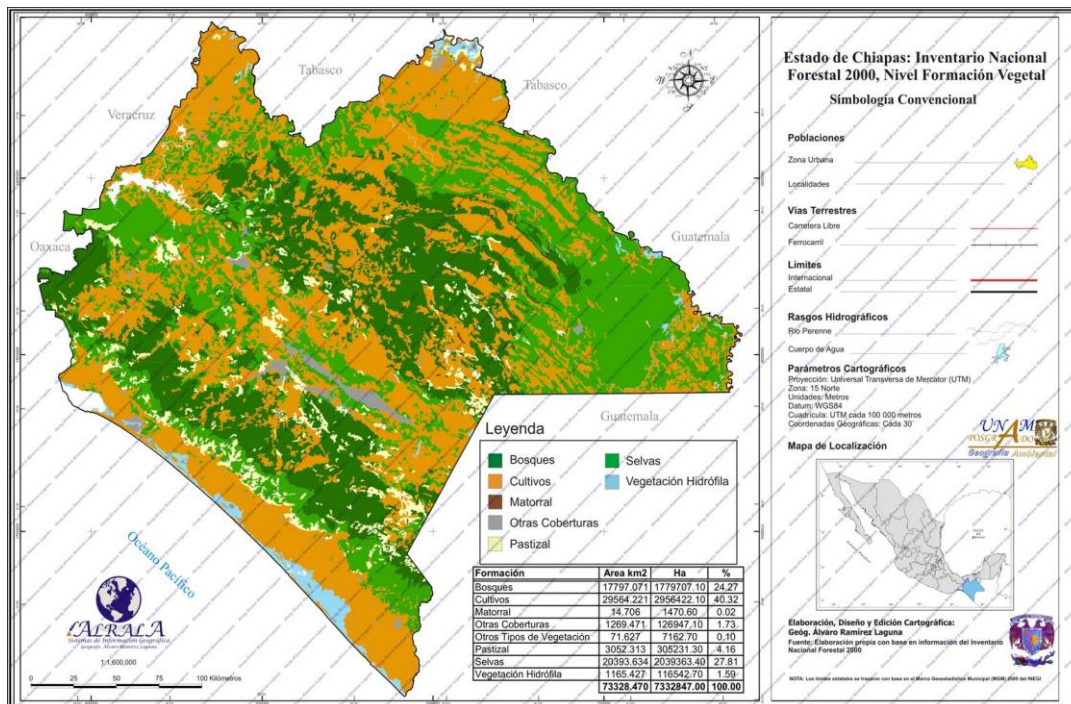


Figura 3. Vegetación de Chiapas. Fuente: Ramírez (2000).

1.3 Aspectos Socioeconómicos.

1.3.1 Población

Chiapas se encuentra dentro de las entidades denominadas en “transición demográfica”, término que denota el paso de un régimen caracterizado por niveles de mortalidad y fecundidad elevados y sin control hacia otro de niveles bajos y controlados. Pero aunque la mortalidad, la fecundidad y la tasa de crecimiento se encuentran en descenso, la población sigue aumentando de manera significativa en números absolutos. A nivel estatal, la estructura de la población es joven, la pirámide poblacional muestra una base amplia, lo que significa que el grueso de la población está compuesto por niños y jóvenes: más del 40% tiene menos de 15 años y la edad media es de solo 18 años. Esto explica una Tasa de Población Económicamente Activa del 54.1% (SHCP Chiapas, 2011; Secretaría de Gobernación, 2011)

De acuerdo con lo anterior, se deducen características poblacionales semejantes en los municipios que conforman la zona de estudio, es decir, que los habitantes de dicha región son predominantemente jóvenes. Por otra parte como se puede apreciar en la Tabla 1, la cantidad de personas por municipio, en la región bajo estudio oscila entre los 10 mil y los 32 mil habitantes, por lo que puede considerarse que se está hablando de ámbitos casi urbanos.

Municipio	Número de Habitantes
Simojovel	31,500
Pueblo Nuevo Solistahuacan	31,405
Pichucalco	28,813
Amatan	21,272
Copainalá	21,050
Huitiupán	20,041
El Bosque	18,559
Ostuacán	17,067
Jitotol	15,000
Tapilula	12,170
Ocotepec	11,788
Pantepec	10,870
Ixhuatán	10,239
Ixtacomitán	10,176
Rayón	9,002
Coapilla	8,444
Solosuchiapa	8,065
Chapultenango	7,332
Tapalapa	4,121
Sunuapa	2,235

Tabla 1. Población por municipios. Fuente INEGI

1.3.2 Actividades Económicas

Aunque la economía de las comunidades bajo estudio está orientada principalmente a la actividad agropecuaria (49.5% de la población está dedicada al Sector Primario), particularmente en la producción de café, miel, cacao, hortalizas, chile, plátano, mango, jamaica, coco, chocolate y azúcar de caña; es evidente que la economía empieza a diversificarse, hacia actividades tales como el turismo nacional e internacional, siguiendo la tendencia estatal a abrirse a dicho tipo de actividades (SHCP Chiapas, 2011; Secretaría de Gobernación, 2011)

1.4 Problemática

La situación geográfica en la que se encuentran emplazados los municipios que conforman la zona de estudio, posee ciertas particularidades en cuanto a su topografía, aspectos climáticos y meteorológicos, que aunados a las actividades económicas poco sustentables como la agricultura y la ganadería, favorecen el desarrollo de procesos gravitacionales o procesos de remoción en masa.

En adición, en gran parte del territorio existe una marcada heterogeneidad litológica entre substratos carbonatados y terrígenos, esta difundida disposición entre substratos terrígenos y carbonatados determina situaciones estructurales e hidrogeológicas muy favorables al desencadenamiento de procesos de remoción en masa; tal es el caso del deslizamiento ocurrido en el valle del río Grijalva, aguas arriba de la presa Peñitas, el 4 de noviembre de 2007 (Hernández, J. R., 2009).

Ejemplos de la predisposición del terreno a desarrollar movimientos de ladera son los siguientes casos acontecidos en la región bajo estudio, que han sido documentados por la prensa local:

“Derrumbe de la cumbre La Pera cubrió los 700 metros que había entre los dos cerros donde se abre paso el río Grijalva, en la zona de su embalse de la presa Peñitas, construyendo un inmenso tapón de piedra y lodo. La caída de esta cantidad de piedras y lodo sobre el embalse de la presa fue lo que provocó la formación de dos olas gigantes que arrastraron el poblado de San Juan Grijalva.

En la reunión del Consejo de Seguridad estatal se informó que al menos 12 poblados del municipio Ostuacán [...] están en zona de riesgo.

La carretera Tuxtla Gutiérrez- Bochil-Pichucalco fue habilitada después de que el paso fue interrumpido cerca del municipio de Pueblo Nuevo Solistahuacán por el desgajamiento de un cerro que arrastró 300 de la vía, lo cual dejó incomunicados nueve municipios de la zona norte.”

**La Jornada, 7 de noviembre 2007,
Ángeles Mariscal, con información de Elio Henríquez**

“El alud ocurrido el 4 de Noviembre en la comunidad de Juan de Grijalva fue producto de la excesiva humedad que penetró la corteza, debilitada previamente por la deforestación, concluyó el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred) de la Secretaría de Gobernación.

Según el estudio realizado por la dependencia y por especialistas del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), el tercer factor desencadenante que ocasionó el alud de casi 5 millones de metros cúbicos de tierra, piedras y arboles fue la inclinación del terreno, de aproximadamente 30 grados.

Los especialistas establecieron que la humedad acumulada, producto de las precipitaciones fluviales (sic.) de la temporada [...] penetraron

entre 30 y 60 metros la corteza terrestre a través de grietas que se formaron por la deforestación que impide el arraigo de la corteza.

La humedad llegó a un estrato de la corteza formado por un material llamado ludita (sic.), que se compone de arcilla playisca (sic) y arenosa, la cual al humedecerse se hace resbaladiza y funge como una especie de “lubricante”.

Luis Manuel García Moreno, subsecretario de Protección Civil, detalló que los geólogos de la UNAM ubicaron otras regiones con las mismas condiciones de riesgo y vulnerabilidad.”

La Jornada, 29 de noviembre 2007

Ángeles Mariscal.

“Ostuacán, Chiapas, 7 Diciembre de 2007. Luis Manuel García Moreno, subsecretario de Protección Civil, advirtió que mil 500 habitantes de las comunidades Playa Larga Primera Sección y Rómulo Calzada, del municipio de Ostuacán, enfrentan la posibilidad de un derrumbe similar al ocurrido al de Juan de Grijalva. “La información que tenemos de los geólogos del Instituto de Geofísica de la UNAM y la Comisión Federal de Electricidad, es que las características y las condiciones del terreno y del suelo en esa zona son similares a las de Juan de Grijalva”, informó.”

La Jornada, 8 de Diciembre de 2007

Elio Henríquez

“Las lluvias, producto del frente frío número 3 que afecta a Chiapas, provocaron dos derrumbes durante la madrugada de este miércoles. En la comunidad Nueva Colombia, municipio de Ángel Albino Corzo, se dio uno de ellos; el saldo fue de tres muertos. En el poblado Reforma y Planada, de Amatán, 16 campesinos de la etnia zoque murieron sepultados por el otro deslave, informó esta noche el gobernador Juan Sabines.

Guillermo Castellanos, supervisor de Obras Públicas de Amatlán, dijo en entrevista telefónica que a las 10 de la noche del martes un cerro cayó sobre más de 30 casas de Reforma y Planada, población a 30 kilómetros de la cabecera municipal. (Figura 4)



Figura 4. Aspecto de la comunidad Reforma y Planada, una de las zonas afectadas.

La madrugada del miércoles un deslizamiento sepultó dos casas de la comunidad Nueva Colombia, en el municipio de Ángel Albino Corzo, donde una mujer y dos menores quedaron atrapados; fueron rescatados horas más tarde con heridas graves.

Personal del Sistema Estatal de Protección Civil se instaló en Reforma y Planada para evaluar, hacer dictámenes de riesgo y poder tomar medidas preventivas. Según reportes del Instituto de Protección Civil estatal, en la actual temporada de lluvias han ocurrido más de 180 derrumbes en distintas partes de Chiapas, la mayoría en áreas no habitadas.”

La Jornada, Jueves 30 de septiembre de 2010.

Ángeles Mariscal y Elio Henríquez

De acuerdo con los sucesos ocurridos e ilustrados anteriormente, es evidente que existe una fuerte necesidad de encontrar una manera de prevenir y solventar la problemática del desarrollo de deslizamientos en muchas áreas del estado de Chiapas, y de manera particular en la región bajo estudio.

2 Sistemas de Información Geográfica y Modelos Digitales de Elevación

2.1 Sistemas de Información Geográfica.

2.1.1 Antecedentes.

Hasta hace unas décadas el manejo de datos geográficos tenía como punto de partida y apoyo el uso de mapas impresos. Sin embargo la utilidad de los mapas resultaba limitada a la hora de pretender realizar análisis cuantitativos, inventarios de recursos, análisis de escenarios diversos, etc., esto debido a que los mapas en formato de papel son documentos estáticos que requieren básicamente de un tratamiento manual de la información geográfica. Actualmente es posible usar herramientas informáticas (Sistemas de Información Geográfica) que posibilitan la realización de tareas como las antes mencionadas y la rápida ejecución de numerosas operaciones aritméticas (Rapallo, R., 2003). No obstante la implementación de los llamados Sistemas de Información Geográfica tiene una historia reciente, acaso cuatro décadas.

Los Sistemas de Información Geográfica son, una herramienta relativamente reciente, pues en rigor no se puede hablar de Sistemas de Información Geográfica, como tales, hasta los años sesenta, aunque en los cincuenta hubiera una serie de antecedentes interesantes (Comas, D. y Ruiz, E., 1993).

Así pues, es entonces en la década de los sesenta, en la que Canadá desarrolla por primera vez un sistema informático que trabaja con datos geográficos, el *Canadian Geographic Information System* (CGIS), con el que propiamente se inicia la carrera tecnológica de los Sistemas de Información Geográfica (Arcila, G., 2003).

Este sistema pionero iniciado en 1964 y activo a partir de 1967, fue concebido y desarrollado como resultado de la preocupación del Gobierno Canadiense al darse cuenta de que su conocimiento sobre la extensión, la calidad y longevidad de la base de los recursos nacionales era limitado, y de que para obtener toda esa información y poder desarrollar planes de manejo de recursos exitosos en un territorio tan extenso, como lo es Canadá, se requería de mucho tiempo y, de más cartógrafos preparados de los que había disponibles en ese momento. Fue así que el Gobierno Federal asignó al Departamento de Agricultura la creación de lo que llegó a ser el primer Sistema de Información Geográfica (Demers, M., 2000).

Aunque el CGIS fue el primer sistema de información geográfica, su concepción y desarrollo estuvo encaminado a la realización de inventarios de los recursos de suelo, para identificar y clasificar dichos recursos naturales, sus usos actuales y los potenciales; es decir que su función fue más como la de una herramienta de medición y como un productor información tabular que como una herramienta de mapeo (Longley, P., et al, 2001). Por otro lado, a pesar de que las primeras tentativas en el desarrollo de sistemas de información geográfica fueron canadienses, es Estados Unidos la nación donde los SIG van a tener el campo de experimentación adecuado, tanto entre las instituciones públicas como en las privadas, y por ende va a ser en este país donde se desarrollen las aplicaciones de mayor envergadura e importancia (Arcila, G., 2003).

Así pues, una segunda manifestación de actividad en el ámbito del manejo de datos geográficos con sistemas informáticos se produjo a finales de 1960 en la Oficina del Censo de Estados Unidos (*United States Census Bureau*), con la planificación de las herramientas necesarias para llevar a cabo el Censo de población de 1970. El programa DIME (*Dual Independent Map Encoding*) creó registros digitales de todas las calles de Estados Unidos, para apoyar la referencia automática y la agregación de los registros del censo (Longley, P., et al, 2001). De esta manera, con la creación de estas dos primeras aplicaciones informáticas (CGIS y DIME), comenzó a tener lugar la evolución de lo que hoy se considera un SIG.

Las herramientas informáticas desarrolladas en esa época, dirigidas principalmente a la creación de documentos cartográficos temáticos, tenían capacidades gráficas muy limitadas, por lo que la salida de los programas al formato impreso era también bastante limitada. No obstante estas carencias, la evolución de las primeras computadoras jugó un papel decisivo en el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica. Aún más, el progreso y los grandes avances en cuanto a tecnología SIG, han estado en todo momento aparejados con la propia evolución en las capacidades de las computadoras, especialmente con las de representación gráfica (Olaya, V., 2004).

Como se mencionó líneas arriba, fueron los Estados Unidos quienes, a través de los trabajos hechos en el *Harvard Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis*, se posicionaron como la primera potencia en lo que a desarrollo de aplicaciones, manejo y producción de información espacial, se refiere.

Para fines de la década de los 60 el Laboratorio de la Universidad de Harvard había creado SYMAP, un programa de cartografía asistida por computadora que manejó una representación de la información en forma vectorial, y el cual tuvo su continuación en los programas de trazado de curvas CALFORM y SYMVU, quienes mantuvieron el mismo enfoque pero mejoraron la calidad de los mapas generados.

Junto a la realización de SYMAP (vectorial) se desarrolló GRID, mismo que posteriormente fue ampliado con IMGRID. Este programa en su posterior evolución constituyó el origen del análisis SIG de tipo raster, el cual, como se detallará más adelante, es la base fundamental de los Modelos Digitales del Terreno (Olaya, V., 2004). Mientras tanto en la Universidad de Yale bajo la dirección de Dana Tomlin se creó el *Map Analysis Package* (MAP), base para el posterior desarrollo de programas como ERDAS e IDRISI.

Durante la última parte de la década de los 60 comenzaron a surgir las primeras aportaciones comerciales, de forma que para 1969 aparece el *Environmental Research Institute* (ESRI), así como otras empresas dedicadas a los SIG. Ya en los años setenta en EE.UU. cuatro organismos destacan en el uso y desarrollo de SIG: en el ámbito universitario, *Harvard University*, en el grupo de instituciones públicas, *United States Census Bureau* (USCB) y *United States Geological Survey* (USGS); y, por último, en las empresas privadas, *Environmental System Research Institute* (ESRI) (Comas, D., y Ruiz, E., 1993).

Por otro lado, la información proporcionada por los satélites e instrumentos de percepción remota ha jugado un papel importante en el desarrollo de los SIG, como fuente de tecnología así como fuente de datos.

Así, para la década de los 70 los sistemas de percepción remota como Landsat estaban empezando a proporcionar vastas y nuevas fuentes de datos en la apariencia de la superficie del planeta desde el espacio, y a explotar las tecnologías de clasificación de imagen y patrones de reconocimiento (Longley, P., et al, 2001).

Aunque el avance en el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica permitió que para 1975 la tecnología SIG fuera capaz de digitalizar de manera semiautomática los datos espaciales, gestionar bases de datos, elaborar mapas de manera interactiva, y hacer superposiciones (*overlay*); fue hasta la década de los 80 que los SIG lograron su despegue definitivo y un mayor apogeo (Arcila, G., 2003). Este auge se debió en gran medida al abaratamiento de los sistemas informáticos, tanto del software como del hardware, lo que facilitó el uso y adquisición de programas SIG.

A partir de la década de los ochenta los Sistemas de Información Geográfica se han extendido considerablemente; tanto las instituciones administrativas, como los centros de investigación y educación superior, han convertido a los SIG en una herramienta indispensable en cualquier trabajo sobre el medio natural y/o social. Por otro lado las empresas privadas incursionaron al trabajo que habían iniciado las instituciones públicas en el desarrollo de estas tecnologías, mismas que hasta ese momento estaban orientadas a solventar las necesidades de las instituciones que las desarrollaban.

Desde entonces y hasta la fecha la iniciativa privada se ha encargado de diseñar y ofertar software y programas comerciales que permiten el tratamiento de datos geográficos con diversas metodologías y herramientas, respondiendo a las necesidades de diferentes tipos de usuarios, en distintos ámbitos de aplicación que van desde cuestiones sociales, políticas y económicas hasta ambientales y administrativas, por citar algunas (Arcila, G., 2003).

Hoy por hoy, los Sistemas de Información Geográfica continúan evolucionando, logrando un tremendo impacto en muchos campos de aplicación, gracias a que permiten el manejo y análisis de datos espaciales, y proporcionan herramientas para analizar y modelar las interrelaciones espaciales (Bonham-Carter, G., 1994). Así pues en palabras de Ignacio Trueba, 1994:

“Lo que nació con la referencia de apoyar informáticamente la elaboración de mapas y cartografía temática, se ha convertido y va a constituir en un próximo futuro, una de las herramientas más importantes para el asesoramiento y apoyo de las decisiones técnicas, económicas, sociales, ambientales, empresariales, administrativas y políticas de nuestro tiempo”

2.1.2 Concepto, Estructura y Capacidades de los SIG.

2.1.2.1 Concepto

Actualmente el término Sistema de Información Geográfica, se usa de manera genérica para referirse a cualquier programa informático con capacidad para manejar datos geográficos (Rapallo, R., 2003). De hecho en la actualidad existen muchas definiciones acerca de lo que son los Sistemas de Información Geográfica; aún más, el concepto en sí ha sufrido muchas modificaciones a partir de su primera noción, lo cual tiene que ver con su constante evolución.

Sin embargo, de acuerdo con su nivel de desarrollo, actualmente un SIG puede considerarse como aquel sistema constituido por hardware y software, el cual permite la captura, manejo, análisis, y despliegue de datos e información geográficamente referenciados (Figura 5).

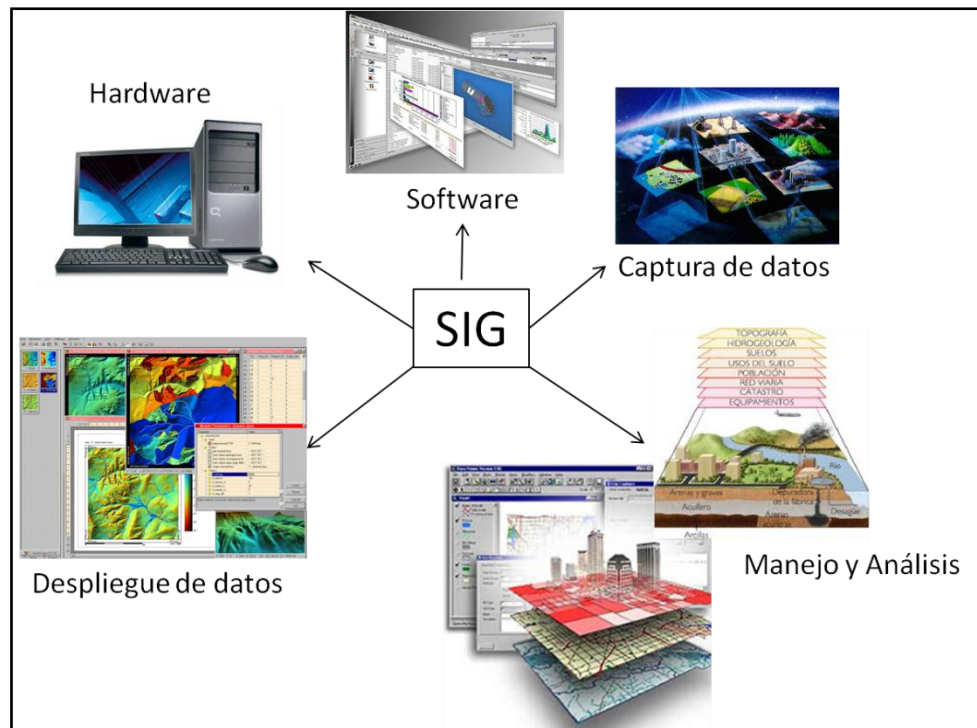


Figura 5. Sistema SIG. Elaboración Propia. Fuente internet.

Ahora bien, una definición que integre las acepciones de los distintos expertos hoy en día en Sistemas de Información Geográfica, versaría de la siguiente manera: Los SIG son el conjunto de programas, aplicaciones y herramientas informáticas que permiten tanto la gestión de información referenciada espacialmente y organizada en bases de datos; como la visualización mediante mapas, modelos e imágenes.

En adición el correcto uso de SIG, proporciona además la posibilidad de ver, entender, cuestionar, analizar e interpretar datos que revelan relaciones, patrones, y tendencias (Carrara, A., et al, 1999).

Así pues, los Sistemas de Información Geográfica son un medio informático efectivo que no solo ayuda a responder cuestiones y resolver problemas, sino también a anticipar condiciones futuras, a evaluar los resultados de una acción o política, a predecir dónde y cuándo puede ocurrir un fenómeno determinado, etc. Lo que a su vez se traduce en un mejor entendimiento del medio en el que vivimos, en una comprensión de nuestro mundo, y en la acertada resolución de los problemas que diariamente afrontamos por medio del uso de computadoras y datos geográficos, es decir, a través de la información espacial. El acrónimo SIG ha llegado a significar mucho más que un tipo de programa computacional, un SIG implica la ciencia del manejo y análisis de la información geográfica (Bonham-Carter, G., 1994).

2.1.2.2 Estructura y Capacidades

De acuerdo con De Miranda, (1996), dentro de un Sistema de Información Geográfica sus principales componentes son siempre y básicamente los siguientes:

- un subsistema de entrada de datos (mapas, datos numéricos etc.)
- un subsistema de almacenamiento y recuperación de datos espaciales en una forma que posibilite un acceso eficiente a los mismos
- un subsistema de manejo , para analizar y generar datos derivados
- un subsistema de presentación de datos, tanto en la forma tabular como gráfica

El subsistema de entrada de datos (Figura 6), permite la incorporación de bancos de datos de información referenciada espacialmente, así como el ingreso de datos con diversas características de formato y contenido, y provenientes de diversas fuentes.

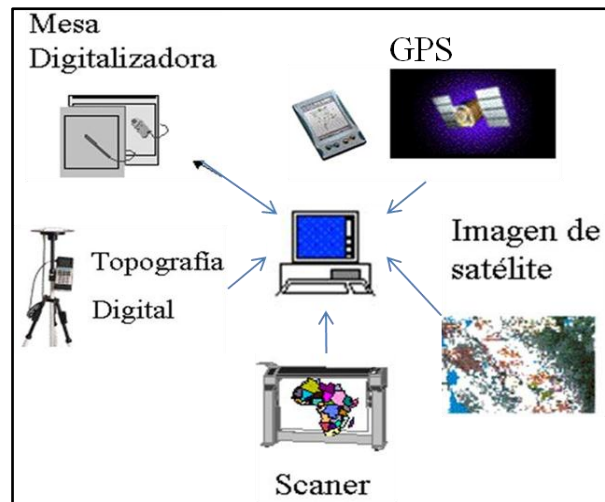


Figura 6. Subsistema de Entrada de Datos.

Ahora bien, toda la información que es introducida al SIG está en posibilidad de quedar capturada y guardada dentro del subsistema de almacenamiento y recuperación de datos (Figura 7), cuya función es la de facilitar la disponibilidad y el manejo de dicha información.

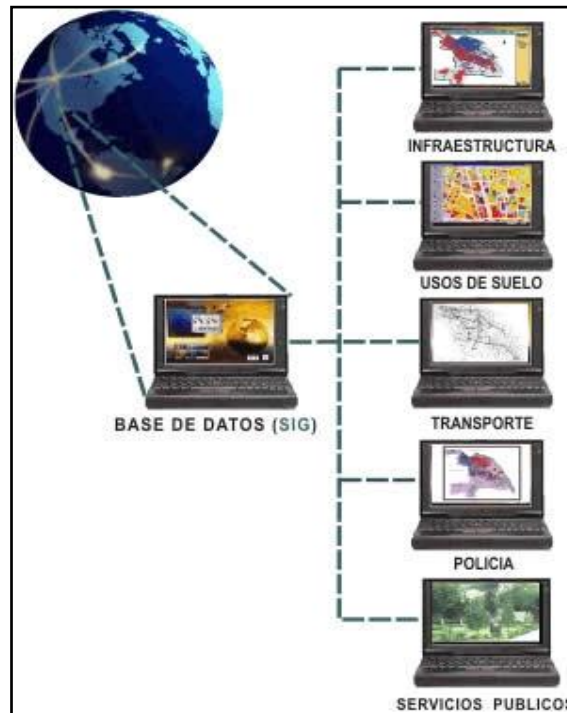


Figura 7. Subsistema de Almacenamiento de Datos

Por otro lado, el subsistema de manejo de datos que permite el análisis de la información (Figura 8) está estrechamente relacionado con el subsistema de presentación de datos o visualización (Figura 9), ya que el despliegue visual de información geográfica ayuda a comprender relaciones espaciales complejas revelando los patrones existentes entre grupos de datos organizados. Así mismo, las capacidades de manipulación y visualización de los SIG permiten encontrar las circunstancias espaciales de una problemática dada, las relaciones detrás de los patrones espaciales, así como conocer los puntos o áreas donde un grupo particular de condiciones son satisfechas (Bonham-Carter, G., 1994).

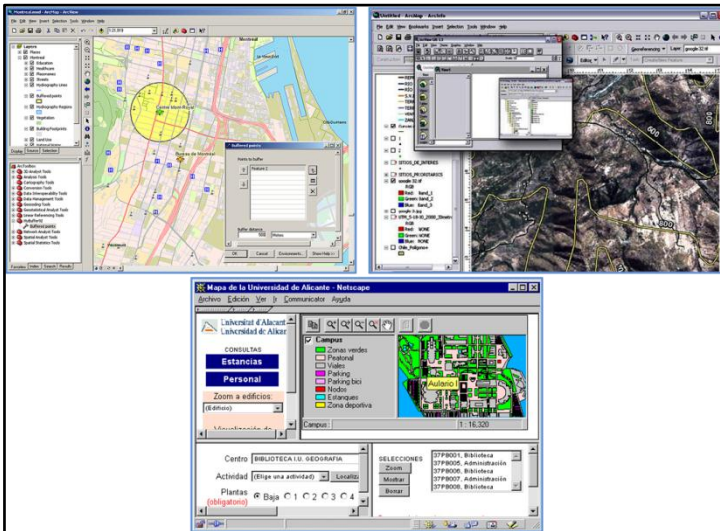


Figura 8. Subsistema de Manejo de Datos.



Figura 9. Subsistema de Visualización.

De igual forma como parte del subsistema de manejo de datos los SIG poseen también la habilidad de unir o fusionar grupos de datos desde fuentes completamente diferentes, y de desplegar y trabajar combinaciones, lo que puede frecuentemente conducir a una comprensión e interpretación de fenómenos espaciales que simplemente no son aparentes cuando los datos espaciales individuales son considerados aisladamente. Los procesos de combinación de capas de datos espaciales son a veces llamados integración de datos, y pueden presentarse visualizando despliegues compuestos de varios tipos de datos, o con modelos de integración que crean un nuevo mapa desde dos o más mapas existentes (Bonham-Carter, G., 1994).

En la resolución de problemas la interacción de muchos procesos debe ser considerada, y el análisis simultáneo de múltiples grupos de datos es imperativo. La tecnología de los Sistemas de Información Geográfica es una manera interactiva de desarrollar métodos automatizados para cuantificar la variabilidad espacial, por lo que hoy por hoy existe una fuerte y mayor integración de los SIG a los métodos de evaluación, diagnóstico y planificación, en todo tipo de problemas dentro de los ámbitos naturales y sociales. Así pues, los SIG son una herramienta invaluable tanto para la gestión y procesamiento de enormes volúmenes de datos, despliegue de imágenes, colección y uso de datos espaciales, como para la elaboración de productos cartográficos estandarizados y personalizados.

En conclusión un Sistema de Información Geográfica no solo ayuda a responder cuestiones y resolver problemas, sino también ayuda a anticipar condiciones futuras, a evaluar los resultados de una acción o política, a predecir dónde y cuándo puede ocurrir un fenómeno determinado, etc., lo que a su vez se traduce en un mejor entendimiento del medio en el que vivimos, en una comprensión de nuestro mundo, y en la acertada resolución de los problemas que diariamente afrontamos por medio del uso de computadoras y datos geográficos, es decir, a través de la información espacial.

2.1.3 Uso de SIG en el Modelamiento de zonas con riesgo de presentar deslizamientos

Dentro del espectro de los SIG y su plétora de aplicaciones, esta plataforma también ha sido efectivamente utilizada para estudiar y resolver problemas relativos a desastres naturales. Algunos ejemplos relacionados con esa temática son: Mapeo de peligros relacionados a la estabilidad de laderas y deslizamientos, zonificación de daños por terremotos, impacto de erupciones volcánicas, daños de inundación de ríos y Tsunamis, erosión costera, impacto de la contaminación como resultado de actividad minera o industrial, calentamiento global (Bonham-Carter, G., 1994; Carrara, A., et al, 1999).

Los SIG poseen fuertes funciones para el análisis y procesamiento de datos con distribución espacial, por lo que su uso puede ayudar a solventar los problemas en el análisis de estabilidad de taludes (Biswajeet, P., 2010; Xie, M., et al, 2004). De manera particular, para el caso de estudios hechos sobre estabilidad de laderas y susceptibilidad al deslizamiento, durante los últimos 20 años, los SIG han sido ampliamente utilizados en la evaluación del peligro de deslizamiento (Ayalew, T., et al, 2004; Exteberría, P., et al, 2005; Irigaray, C., et al, 2007; Remondo, J., et al, 2003).

Dentro del aspecto de mapeo de zonas susceptibles a presentar deslizamientos, existen hoy por hoy numerosos métodos basados en SIG para analizar tal susceptibilidad en un área determinada (Irigaray, C., et al, 2007). Así pues, ha habido un rápido progreso en la preparación de mapas de susceptibilidad debido al desarrollo de la tecnología SIG y la Percepción remota, técnicas que han probado ser bastante valiosas en la elaboración de este tipo de mapas (Yalcín, A., y Bulut, F., 2007).

2.2. Modelos Digitales de Elevación

A lo largo de la historia el relieve se ha representado a través de la cartografía en papel, comúnmente mediante el trazo de curvas de nivel. De esta manera, la representación de la topografía del terreno se podía empalmar con otros aspectos de la superficie, lo que permitía al lector llevar a cabo una interconexión e interpretación de dichos aspectos. Sin embargo:

“las operaciones analíticas sobre el relieve, que exigen numerosos cálculos, eran sumamente laboriosas y difíciles de realizar. De este modo, muchas aplicaciones prácticas quedaban limitadas por la organización analógica y compleja del mapa topográfico. Estas necesidades dieron origen al desarrollo de una nueva forma de representar el relieve en forma digital, es decir al desarrollo de Modelos Digitales del Terreno.” (Bosque, J., 1995).

Los Modelos Digitales de Elevación así como los Modelos Digitales del Terreno, hablando de manera genérica, son una representación numérica del relieve, una modelación matemática de la topografía (Hengl, T., et al, 2003). Cabe señalar que esta modelación se hace estableciendo siempre una relación entre el sistema de coordenadas y un sistema de proyección geográfica.

2.2.1 Conceptos: Modelo Digital de Elevación (MDE) y Modelo Digital del Terreno (MDT)

MDE

De acuerdo con Felicísimo (1999), un Modelo Digital de Elevaciones se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno. Dicha representación está construida a partir de una cantidad considerable de puntos muestreados en la superficie terrestre con coordenadas x, y, z conocidas,

considerando que las elevaciones forman una superficie tridimensional ondulada, en la que dos dimensiones están representadas por los ejes X y Y en un espacio ortogonal plano, y que la tercera dimensión sería la altura representada por Z (Bosque, J., 1995).

De esta forma un MDE se refiere a un conjunto de puntos en un espacio cartesiano atribuido con valores de elevación que se aproximan a la superficie del suelo de la Tierra. Un Modelo Digital de Elevaciones implica, además, que la elevación está disponible continuamente en cada posición de los puntos, en una resolución dada; por lo que, un MDE muestra las alturas de la superficie terrestre sobre el nivel medio del mar (Pike, R., et al, 2009).

Así pues, un MDE es una representación cartográfica con una base numérica a partir de la cual se puede extraer, con la ayuda de herramientas informáticas y operaciones matemáticas, toda la información posible de las zonas físicas que el mismo modelo representa (Hengl, T., et al, 2003). De esta manera el análisis de la superficie terrestre que tiene como punto de partida los valores de elevación contenidos en las celdas de un MDE llega a ser un trabajo que, mediante la aplicación de procedimientos matemáticos diversos, permite la obtención de resultados de mayor detalle, precisión y calidad, respecto de las clásicas representaciones cartográficas (Olaya, V., 2004).

MDT

Un Modelo Digital del Terreno, en palabras de Felicísimo (2001) es una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua.

Ahora bien, en la cartografía convencional el mapa topográfico constituye la infraestructura básica del resto de los mapas. De manera analógica los Modelos Digitales de Elevación, que describen la altimetría de una zona mediante un conjunto de cotas, representan la base para la elaboración de Modelos Digitales del Terreno; ya que a partir de la información contenida explícita o implícitamente en los primeros es posible construir un conjunto de MDT derivados: los modelos más sencillos pueden construirse exclusivamente con la información del MDE y reflejan características morfológicas simples como la pendiente, la orientación, etc. Por otro lado, modelos más complejos pueden derivarse incorporando información auxiliar al MDE y utilizando conjuntamente la descripción morfológica del terreno y simulaciones numéricas de procesos físicos (Felicísimo, A., 1994).

Por otra parte, aunque los Modelos Digitales del Terreno son esencialmente estáticos, su naturaleza digital permite utilizarlos para realizar procesos de simulación dinámica y derivación de nuevos modelos con cierta facilidad. Estos procesos de simulación dinámica son posibles gracias al diseño de algoritmos numéricos, es decir, construyendo secuencias explícitas de operaciones matemáticas que conducen a la solución de problemas concretos (Felicísimo, A., 1999).

2.2.2 Estructura y Construcción

Estructura

Las estructuras de datos en los sistemas de información geográfica y, por extensión en, los modelos digitales de elevación y del terreno, se han dividido en dos grupos en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectorial y raster (Doratti, M., et al, 2002; Wilson, J., y Gallant, J., 2000).

El modelo de datos vectorial está basado en entidades u objetos geométricos definidos por las coordenadas de sus nodos y vértices. En el modelo vectorial los atributos del terreno se representan mediante puntos, líneas o polígonos con sus respectivos atributos. Los puntos definen mediante un par de valores de coordenadas con un atributo de altitud, las líneas mediante un vector de puntos –de altitud única o no –y los polígonos mediante una agrupación de líneas (Hengl, T., et al, 2003).

El modelo de datos raster está basado en localizaciones espaciales, a cada una de las cuales se les asigna el valor de la variable para la unidad elemental de superficie. En el modelo raster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de la superficie no nula que cubren el terreno con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada, estas unidades se llaman celdas (Pike, R., et al, 2009).

Como se mencionó líneas arriba, la estructura de los MDE y MDT se puede representar, principalmente, mediante dos modelos de datos: la matriz de alturas u organización raster y la estructura TIN (Red de Triángulos Irregulares) u organización vectorial (Figura 10). Ambos están basados en el empleo de puntos para la representación de la información que constituye a los modelos.

En los dos casos el modelo se genera a partir de una muestra de datos puntuales repartidos de algún modo, en muchas ocasiones aleatoriamente, sobre un plano. Otra posibilidad es recoger una muestra de las altitudes reales empleando las curvas de nivel existentes en el mapa fuente y a partir de esa muestra obtener el MDE (Bosque, J., 1995).

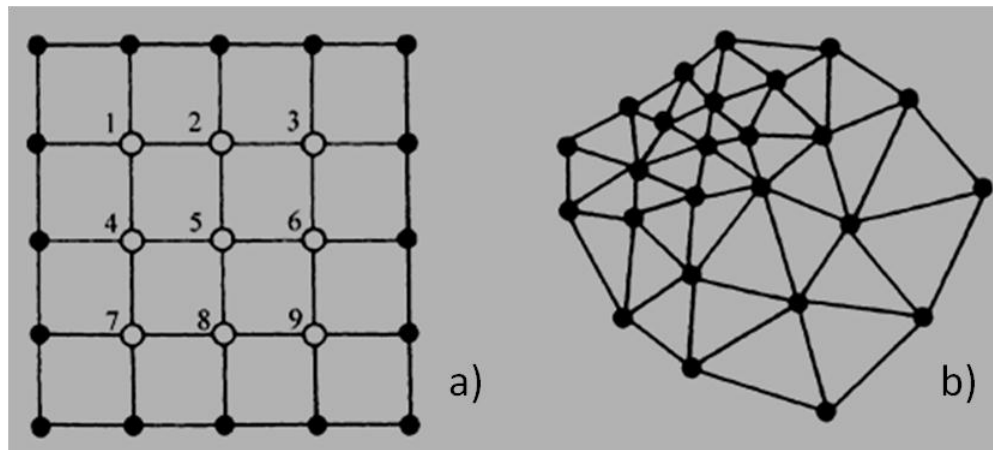


Figura 10. a) Matriz de alturas: estructura Raster, b) Estructura de Triángulos Irregulares.
Tomado de Willson J. y Gallant J., 2000.

Así pues, la estructura de datos del modelo vectorial TIN se compone de un conjunto de triángulos irregulares adosados. Los triángulos se construyen ajustando un plano a tres puntos cercanos no colineales, y se adosan sobre el terreno formando un mosaico que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, en función de la complejidad del relieve.

Se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a un conjunto previo de puntos (Wilson J., y Gallant, J., 2000).

Por otro lado, la estructura del modelo raster o matricial, es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda. La retícula adopta normalmente la forma de una red regular de malla cuadrada.

En esta estructura la localización espacial de cada punto está determinada de forma implícita por su situación en la matriz, una vez definidos el origen y el valor del intervalo entre filas y columnas (Pike, R., et al, 2009).

Cabe señalar que la elección de la estructura de datos a utilizar para el desarrollo de un trabajo de análisis del terreno, es de suma importancia porque condiciona el futuro manejo de la información. Así mismo es conveniente destacar que en la práctica la gran mayoría de los sistemas de información geográfica han optado por usar matrices regulares en el tratamiento de los MDE y MDT. Esto debido básicamente a que si bien los TIN son capaces de representar con fidelidad la topografía por su potencial para adaptarse al terreno con un nivel de resolución variable, ellos no permiten efectuar cálculos ni desarrollar modelos con la facilidad y rapidez de las matrices. Estas se han mostrado como estructuras mucho más simples conceptualmente y mas adaptadas al tratamiento informático (Felicísimo, A., 2001).

Construcción

La captura de la información hipsométrica constituye el paso inicial en el proceso de construcción del MDE, e incluye la fase de transformación de la realidad geográfica a la estructura digital de datos. Se trata de una fase de gran trascendencia porque la calidad de los datos es el principal factor limitante para los tratamientos que se realicen posteriormente. Tras obtener los datos, éstos deben ser estructurados para formar el MDE en alguna de las formas presentadas en el apartado anterior.

Las fuentes de las cuales se puede obtener la información para los datos de elevación en un MDE son: levantamientos terrestres, captura de datos fotogramétricos, levantamientos cartográficos existentes (mapas topográficos), escaneo aéreo con laser, e imágenes satelitales;

y algunas de las técnicas para derivar un MDE incluyen la digitalización de contornos de mapas topográficos existentes, técnicas fotogramétricas, etc.(Doratti, M., et al, 2002; Hengl, T., et al, 2003; Van Westen, C., et al, 2008). Ahora bien, los métodos básicos para conseguir los datos de altitudes pueden dividirse en dos grupos: directos, cuando las medidas se realizan directamente sobre el terreno real, e indirectos cuando se utilizan documentos analógicos o digitales elaborados previamente.

Métodos directos: medida directa de la altitud sobre el terreno

1. Altimetría: altímetros radar o laser transportados por plataforma aéreas o satélites
2. GPS: sistema de localización
3. Levantamiento topográfico: estaciones topográficas con salida

Métodos indirectos: medida estimada a partir de documentos previos

1. Restitución a partir de pares de imágenes
 - a) Estéreo-imágenes digitales: imágenes tomadas por satélites
 - b) Estéreo-imágenes analógicas: imágenes fotográficas convencionales
 - c) Interferometría radar: imágenes de interferencia de sensores radar
2. Digitalización de mapas topográficos
 - a) Automática: mediante escáner y vectorización
 - b) Manual: mediante tablero digitalizador

(Felicísimo, A., 2001)

A partir de la información de base reunida de alguna manera la construcción de un MDE suele necesitar realizar una fase de interpolación espacial. La interpolación espacial es un procedimiento que permite calcular el valor de una variable en una posición del espacio (punto no muestral, donde se estima un valor de la altura), conociendo los valores de esa variable en otras posiciones del espacio (puntos muestrales, con valores verdaderos) (Bosque, J., 1990).

Los procedimientos de interpolación son muy distintos según se desee obtener el modelo raster o el modelo TIN. Igualmente existen diferencias en cuanto a cuál es la organización de la información de partida: puntos o líneas (Bosque, J., 1995).

2.2.3 Derivación de variables

Los modelos digitales de elevación son cada vez más usados para el análisis visual y matemático de la topografía, el paisaje y las geoformas, así como para modelar procesos de la superficie, esto gracias a que un MDE puede ser usado para extraer información topográfica vital a partir de la derivación de atributos topográficos, parámetros geomorfométricos, variables morfométricas o información del terreno en general (Hengl, T., et al, 2003; Kamp, U., et al, 2003).

Así pues, un MDE no solamente contiene información explícita acerca de la altitud de un área muestreada en diversos puntos (modelo TIN) o celdas (modelo raster) sino que también aporta información relativa a las relaciones (distancia y vecindad) entre los diferentes valores de altitud. Esto permite el cálculo mediante diversos procedimientos matemáticos, de nuevas variables topográficas (Pike, R., et al, 2009).

Para lograr una exitosa extracción de atributos, parámetros o variables topográficas, el MDE debe representar el terreno tan exactamente como sea posible, ya que la exactitud del MDE determina la fiabilidad del análisis geomorfométrico (Kamp, U., et al, 2003). Sin embargo, errores sistemáticos y no sistemáticos en los MDE pueden confundir las relaciones esperadas entre los atributos del terreno calculados y las condiciones que controlan un sitio. Estos problemas pueden incrementar cuando las derivadas de primer y segundo orden, tales como la pendiente y la curvatura son calculadas (Wilson J., y Gallant, J., 2000).

La calidad de un MDE es una medida de cuan exacta es la elevación en cada pixel y cuan exactamente es presentada la morfología. En ese sentido son varios los factores (rugosidad del terreno, densidad del muestreo, espacio entre celdas o tamaño del pixel, algoritmos de interpolación, resolución vertical, y algoritmos de análisis del terreno) que juegan un rol importante en la calidad de los productos derivados del MDE. El problema, como ya se mencionó es que algunos algoritmos usados en el cálculo de parámetros del terreno son más sensitivos a los cambios relativos de los valores de elevación del vecindario. De esta manera los errores o artefactos pueden no ser visibles en el MDE original, pero frecuentemente serán claramente visibles como valores indefinidos en los parámetros derivados (Hengl, T., et al, 2003).

Para solventar los problemas referentes a la calidad de un Modelo Digital de Elevaciones, existen un conjunto de técnicas utilizadas para mejorar la semejanza geomórfica de un MDE. A estas técnicas se les conoce usualmente con el nombre de filtros. De esta manera, un conjunto de métodos de filtrado pueden ser aplicados para ajustar los valores originales del MDE.

El proceso de filtrado del MDE puede ser considerado como una serie de pasos, los cuales pueden ser aplicados iterativamente para producir un MDE más realista, para minimizar los errores en los parámetros derivados (Hengl, T., et al, 2003). El proceso de generación de un MDE y la derivación de atributos topográficos a partir del mismo, para un posterior análisis integral de la superficie se puede resumir en los pasos que muestra el esquema de la Figura 11.

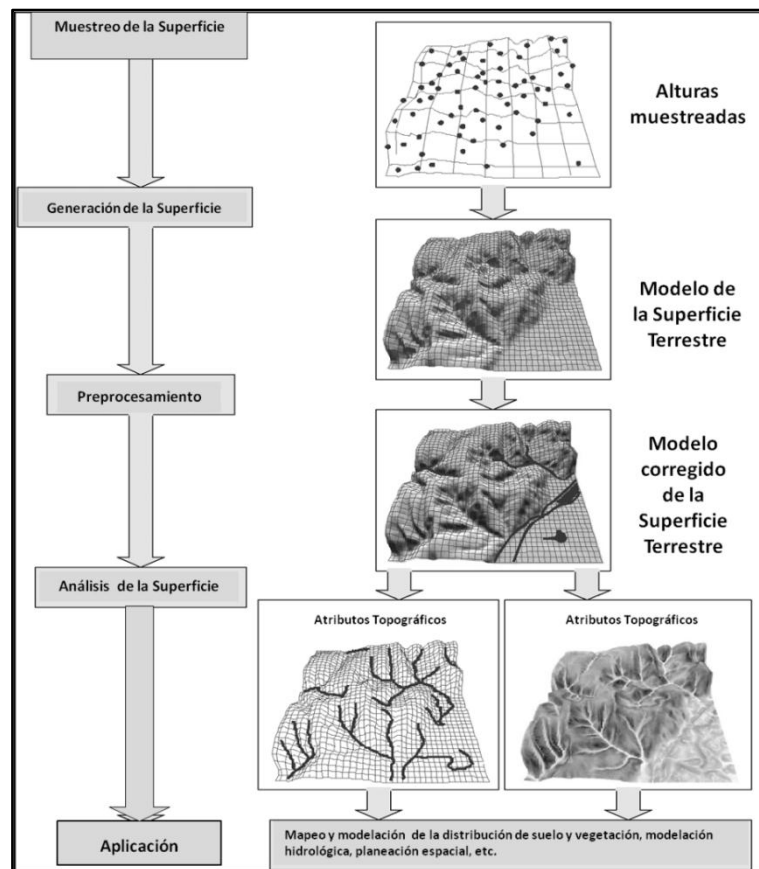


Figura 11. Diagrama de generación de un MDE y obtención de variables.

Tomado de Pike, R., Evans, I., y Hengl, T. (2009)

Continuando con la obtención de información topográfica, para que de un MDE en formato raster, se pueda derivar una variable como la Pendiente, la Curvatura, el Aspecto o cualquier otra, son necesarias determinadas operaciones y funciones matemáticas que permitan la caracterización del terreno en cuestión (Wilson J., y Gallant, J., 2000).

Sin embargo resulta evidente que lograr que una sola función se ajuste plenamente a la topografía real del terreno representado en el MDE, es prácticamente imposible. No obstante, si en lugar de aplicar la función a nivel global en la totalidad de la malla, solo se adecua tal función a nivel local con el entorno inmediato de un punto, se lograra obtener mayor precisión en la caracterización del terreno y los parámetros o variables que puedan calcularse a partir de la ecuación que se deduzca en dicha porción serán más representativos de las características reales del punto tomado (Olaya, V., 2004).

Ahora bien, el entorno inmediato de un punto o celda da lugar a una submalla de $3 \times 3 = 9$ celdas, las cuales son suficientes para llevar a cabo el ajuste antes mencionado (Pike, R., et al, 2009). Por lo tanto, este mecanismo de operaciones por submallas con puntos centrales, es el que rige la derivación de variables en un MDE, permitiendo así la obtención de nuevos valores para el punto empleado como centro en cada caso. Para que la totalidad de las celdas que integran un MDE sean analizadas, la submalla se desplaza por toda la malla (Figura 12), de modo que todas las celdas sean en un momento dado punto central (Olaya, V., 2004).

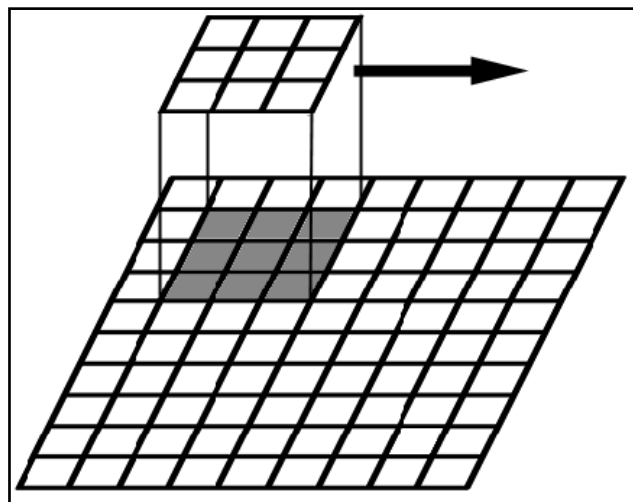


Figura 12. Esquema de desplazamiento de una submalla de 3×3 para el análisis dentro de un MDE

Cabe señalar que una herramienta necesaria para explotar todas las posibilidades analíticas de un MDE, la representan los Sistemas de Información Geográfica. Con ellos es posible crear, gestionar y representar los estratos temáticos (alturas, pendientes, curvaturas, aspecto, etc.,) derivados del MDE (Bosque, J., 1995).

Las principales variables extraíbles de un MDE se desglosan a continuación:

Pendiente

Dentro de un Modelo Digital de Elevaciones la pendiente es obtenida en cada una de las celdas que lo constituyen. En esta variable se calcula la tasa máxima de cambio en el valor de una celda respecto de sus celdas vecinas. Esencialmente, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre una celda y sus ocho vecinos determina el declive más empinado cuesta abajo desde dicha celda. Desde un enfoque conceptual, la función matemática de la pendiente adecua un plano a los valores de Z de una submalla de celdas de 3×3 , en torno de la celda de transformación o punto central. El valor de la pendiente de este plano es calculado utilizando la técnica de máximo promedio.

En la superficie del MDE la tasa de cambio (delta) en las direcciones horizontal (dz / dx) y vertical (dz / dy) desde la celda central determina la pendiente. La Pendiente comúnmente es medida en grados.

Los valores de la celda central y sus ocho vecinos determinan las deltas horizontales y verticales.

a	b	c
d	e	f
g	h	i

De esta manera la tasa de cambio en la dirección X para la celda 'e' es calculada con el algoritmo:

$$[dz/dx] = ((c + 2f + i) - (a + 2d + g)) / (8 * x_tamaño_celda)$$

Mientras que la tasa de cambio en la dirección Y para la celda 'e' es calculada con el siguiente algoritmo:

$$[dz/dy] = ((g + 2h + i) - (a + 2b + c)) / (8 * y_tamaño_celda)$$

Resumiendo, la Pendiente es aquella variable derivada del MDE que identifica el declive más empinado para una ubicación en una superficie. Así pues, dentro de un raster la pendiente es el índice máximo de cambio de altitud sobre cada celda y sus ocho vecinos.

Aspecto

El aspecto, de manera similar a la pendiente, es una variable que se obtiene a partir de las primeras derivadas de la función matemática que se ajusta a la superficie tratada. Así mismo, el concepto del aspecto u orientación, como también se le conoce, no es otro que el del ángulo formado por el vector normal a la superficie en un punto dado, y el del vector que define la dirección Norte,

entendiendo dicha orientación como el ángulo acimutal de la perpendicular al terreno, de tal modo que tome un valor de 0° para el caso de una orientación Norte, 90° para la orientación Este, y así sucesivamente (Olaya, V., 2004).

Curvatura

La curvatura en un punto dado, puede definirse como la tasa de cambio en la pendiente y depende, por tanto, de las derivadas de segundo grado de la altitud, es decir, de los cambios de pendiente en el entorno de un punto o celda central (Felicísimo, A., 2001), Figura 13.

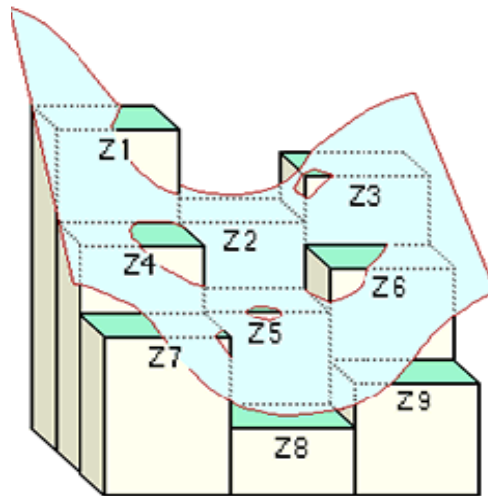


Figura 13. Curvatura

Esta variable básicamente está compuesta por la curvatura del Perfil o longitudinal, es decir, la curvatura descrita en la dirección de la pendiente máxima, y la curvatura Planimétrica o transversal, la cual se extiende de manera perpendicular a la dirección de la pendiente máxima. Ahora bien, por un lado la curvatura del Perfil tiene incidencia sobre la aceleración y la desaceleración del flujo en una ladera, por lo que influye en la erosión y la deposición; y por otro lado la curvatura en Plan influye en la convergencia y la divergencia de un flujo, es decir, en la concentración o dispersión de dicho flujo.

Hasta aquí las principales variables que pueden extraerse a partir de la manipulación matemática de un Modelo Digital de Elevaciones. Como se ha visto existen amplias posibilidades de extraer información topográfica de un MDE, en ese sentido los parámetros derivados del MDE pueden ser usados exitosamente para predecir la distribución de muchos fenómenos naturales como procesos erosionales, incendios, así como la probabilidad de peligros de ladera (Pike, R., et al, 2009). Esto último gracias a que como la topografía es uno de los mayores factores en el análisis del peligro a deslizamientos, la generación de una representación de la elevación de la superficie juega un rol mayor (Van Weten, C., et al, 2008).

3. Modelo de Susceptibilidad de Laderas a presentar Deslizamientos

3.1 Deslizamientos

Las laderas son la forma más común en la Tierra y aunque la mayoría parecen estables y estáticas, son dinámicas, es decir son sistemas en constante evolución. El material en la mayoría de las laderas está continuamente moviéndose pendiente abajo en tasas que varían desde una imperceptible reptación de suelo y roca hasta estruendosas avalanchas y caídas de rocas que se mueven a velocidades de 160 km/H o más (Keller, E., y Bodgett, R., 2007).

La inestabilidad de laderas, la remoción en masa, los deslizamientos, los desplomes, etc., están englobados en el concepto de procesos gravitacionales de remoción en masa, y se definen como el desplazamiento ladera abajo de una masa compuesta por rocas, detritos, suelos, sedimentos, etc., como respuesta a un ajuste que los materiales presentes en una ladera hacen en relación con su ambiente.

La fuerza de gravedad los motiva, y la precipitación, sismicidad y actividades antrópicas constituyen sus principales factores detonantes (Hernández, V., 2009). Para fines de este trabajo se utiliza el término deslizamientos de manera genérica para referirse a cualquier tipo de proceso gravitacional, ya que dicho término es usado ampliamente en un sentido general para significar cualquier movimiento en masa ladera abajo, bajo la influencia de la gravedad (Karadogan, S., y Yildirim, A., 2005; Regmi, N., et al, 2010).

Los deslizamientos son uno de los principales procesos naturales que modelan la superficie terrestre. Este tipo de fenómenos son inducidos de manera natural o por actividad antrópica; sin embargo, únicamente cuando los deslizamientos amenazan a la humanidad es que ellos representan un peligro (Pradhan, B., et al, 2006). Los deslizamientos han causado a lo largo de la historia un considerable número de desastres en diversas partes del mundo, incluyendo México (Alcántara, I., y Murillo, F., 2008). Esto debido principalmente a los daños a los asentamientos y a la infraestructura, así como las víctimas humanas que ellos traen consigo, por lo que queda claro que es necesario considerar tales procesos en la planeación del uso de suelo (Jiménez-Perálvarez, J., et al, 2009).

Los deslizamientos ocurren donde las condiciones geológicas y morfológicas son favorables (Carrara, A., et al, 1999). Así pues, los flujos de derrubios, avalanchas, los deslizamientos, etc., pueden impactar las construcciones y amenazar la vida humana, además de provocar pérdidas económicas (Perotto-Baldiviezo, H., et al, 2004; Regmi, N., et al, 2010). De hecho los deslizamientos se encuentran entre los más peligrosos desastres naturales (Guzzetti, F., et al, 1999).

Afortunadamente estos procesos y sus efectos pueden llegar a comprenderse con la ayuda de modelos simples de aproximación relacionados con la topografía. Los estudios pueden definir las zonas amenazadas por derrumbes, aludes o corrientes de lodo (Lugo, J., 1999).

De esta manera, una de las estrategias para reducir los efectos causados por los deslizamientos es la cartografía donde se representa la ubicación espacial de los procesos. Esto es la base para evaluar la susceptibilidad en la cual se hace referencia a la predisposición del terreno a la ocurrencia de deslizamientos y no implica un aspecto temporal del terreno (Santacana, N., 2001).

3.2 Factores Causales

Las catástrofes naturales son controladas o dependen de un gran y complejo conjunto de factores naturales y humanos. Más aún, cada tipo de catástrofe depende de un conjunto específico de factores y procesos. Los deslizamientos son un peligro natural, en ocasiones influenciado por el hombre, particularmente complejo, resultado de la interacción de factores tales como la topografía, hidrología, materiales, entre otros (Carrara, A., et al, 1999; Doratti, M., et al, 2002).

Así pues, la ocurrencia de los deslizamientos está ligada a la combinación de factores que reflejan la configuración natural de un área determinada (Neuhaüser, B., y Terhorst, B., 2007; Van Westen, C., et al, 2003), lo que implica que los factores que determinan la inestabilidad de una ladera puedan variar de acuerdo a la zona de estudio (Jiménez-Perálvarez, J., et al, 2009).

Asimismo, los deslizamientos se ven afectados por el estado físico de las laderas, mismo que condiciona su estabilidad y el cual involucra a la morfología de la ladera en términos de ángulo de la pendiente, orientación, elevación, curvatura, etc., así como la geología, la hidrología, el uso de suelo y vegetación, entre otros aspectos (Ghosh, S., et al, 2011; Jiménez-Perálvarez, J., et al, 2009).

A los factores que de alguna manera están relacionados con el desarrollo de deslizamientos, ya sea en forma directa o indirecta, se les conoce frecuentemente como parámetros controladores (Ayalew, L., et al, 2004), factores determinantes (Jiménez-Perálvarez, J., et al, 2009), factores condicionantes (Hervás, J., et al, 2002; Remondo, J., et al, 2003), factores causales (Neuhaüser, B., y Terhorst, B., 2007), etc. Para fines de este trabajo y a lo largo de su desarrollo se denominará como Factores Causales al conjunto de variables que se utilizarán para el análisis de susceptibilidad al deslizamiento.

Los deslizamientos son controlados por leyes mecánicas que pueden ser determinadas empíricamente, estadísticamente o en modo determinístico; de esta manera las condiciones que causan deslizamientos (factores de inestabilidad) pueden ser reunidas y usadas para construir modelos predictivos de la ocurrencia de deslizamientos (Guzzetti, F., et al, 1999). Ahora bien, la información requerida para la evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento, consiste de la representación espacial de los factores que son considerados relevantes para la predicción de la ocurrencia de futuros deslizamientos (Van Westen, C., et al, 2008).

Como se mencionó antes, los factores causales varían de acuerdo al área de estudio. Sin embargo, existen factores que independientemente de la zona de estudio poseen, en general, un alto grado de trascendencia en la estabilidad de las laderas; en este grupo se encuentran la Geología y la Pendiente (Kamp, U., et al, 2010; Moreiras, S., 2005). Ahora bien, en adición a la Pendiente y a la Geología, para este trabajo se han seleccionado otros factores que de acuerdo a las características del área de estudio resultan de relevante importancia en el desarrollo de deslizamientos. Tales factores son: geometría de la pendiente o Curvatura, Aspecto, y Uso de suelo y Vegetación.

3.2.1 Pendiente

La pendiente juega un papel primario en gobernar la presencia y comportamiento de los deslizamientos, por lo que ésta resulta ser uno de los parámetros controladores más importantes y con buen poder predictivo (Falaschi, F., et al, 2009; Kamp, U., et al, 2010). Lo anterior es debido a que por un lado la inclinación de la pendiente es responsable de que las formaciones en superficie sean altamente sensibles a pequeños cambios en su cohesión (Remondo, J., et al, 2003), y por el otro, se ha demostrado, con excepción de ciertos materiales, que mientras más inclinada sea la pendiente, mayor es la posibilidad de que la gravedad actúe sobre los materiales y éstos se desplacen ladera abajo (Alcántara, I., y Murillo, F., 2008; Yalcín, A., y Bulut, F., 2007). Más aún, la pendiente afecta la cantidad de agua que se infiltra en el suelo y la ruta que puede seguir este flujo (Alcántara, I., y Murillo, F., 2008; Santacana, N., et al, 2003).

La ocurrencia de deslizamientos incrementa potencialmente con el gradiente ya que en general las pendientes más altas y más empinadas tienen más alta susceptibilidad a presentar actividad de deslizamientos (Moreiras, S., 2005; Wang, H., et al, 2007) debido principalmente a que pendientes muy empinadas proveen la más grande energía potencial para inducir la falla (Neaupane, K., y Piantanakulchai, M., 2006). De esta manera, se espera que en afloramientos de lecho rocoso caídas de rocas aparezcan en pendientes sobre los 45°; mientras que en pendientes cubiertas con depósitos, fallas de derrubios se espera que ocurran en ángulos de pendiente sobre los 30°, por otro lado deslizamientos someros y flujos de derrubios sucederán por lo general en ángulos de pendiente sobre los 25°, finalmente deslizamientos rotacionales son factibles en depósitos con pendientes sobre los 15° (Corominas, J., et al, 2003).

Así pues, la pendiente esta revestida de una gran importancia que radica en el hecho de que prácticamente todos los procesos que tienen lugar sobre un territorio, se ven influenciados por ella (Olaya, V., 2004), por lo que la pendiente puede ser usada como herramienta para localizar sitios potenciales de deslizamientos. Y en efecto, en el entendido de que existe una relación compleja entre el ángulo de la pendiente y la estabilidad de la ladera la mayoría de las evaluaciones regionales de susceptibilidad a los deslizamientos, así como aplicaciones SIG relacionadas con la estabilidad de laderas utilizan el ángulo de la pendiente como uno de los factores más importantes (Chung, Ch., y Fabbri, A., 2003; Fernández, T., et al, 2003; Van Westen, C., et al, 2008; Van Westen, C., et al, 2003).

3.2.2 Geología

Por su parte, al igual que la pendiente, la litología es el otro factor importante que determina la cohesión de los materiales y contribuye significativamente a la inestabilidad de las laderas (Neuhaüser, B., y Terhorst, B., 2007; Remondo, J., et al, 2003). Debido a que la resistencia de una formación rocosa competente puede reducir el impacto del intemperismo o la erosión, la probabilidad de deslizamientos disminuye con el aumento de la resistencia de las formaciones rocosas (Chen, H., 2010). Así pues, la roca sólida y los suelos compactos son menos propensos a deslizarse que los escombros sueltos o compactados pobremente. Entonces problemas como el desarrollo de deslizamientos son generalmente ocasionados por la presencia de rocas incompetentes (Basabe, P., et al, 1996).

En adición, la litología ejerce un control fundamental sobre la geomorfología de un paisaje, ya que la naturaleza y el ritmo de los procesos geomorfológicos dependen, hasta cierto punto, de las características de los materiales. Así mismo, la litología determina el tipo, la distribución, estado y movimiento del agua subterránea, lo cual afecta o puede detonar un deslizamiento. De esta manera procesos como los deslizamientos tienen correlación directa con la litología (Alcántara, I., y Murillo, F., 2008; Neaupane, K., y Piantanakulchai, M., 2006; Xie, M., et al, 2004).

De acuerdo con todo lo anterior la litología es considerada como uno de los parámetros más importantes a ser tomados en cuenta en el análisis de la distribución espacial de la ocurrencia de deslizamientos (Alcántara, I., y Murillo, F., 2008; Ghosh, S., et al, 2011; Kamp, U., et al, 2010; Moreiras, S., 2005).

Por lo que la litología es el factor causal usado de manera más común en la mayoría de los estudios de estabilidad de laderas (Alcántara, I., y Murillo, F., 2008; D'Amato, G., et al, 2004; Falaschi, F., et al, 2009, Jiménez-Perálvarez, J., et al, 2009; Kamp, U., et al, 2010; Van Westen, C., et al, 2008).

3.2.3 Curvatura

Esta variable constituye uno de los principales factores que controlan la superficie del terreno donde los deslizamientos ocurren (Nefeslioglu, H., et al, 2010), por lo que de acuerdo con varios autores, la forma de la pendiente es importante en la inicialización del fenómeno de deslizamiento (D'Amato, G., et al, 2004). La curvatura de la pendiente es un factor causal crucial, entre otras cosas, porque tiene relación directa con la capacidad de concentración de agua en una ladera (Remondo, J., et al, 2003). Asimismo, la curvatura determina si una pendiente tiende a promover la aceleración o la desaceleración, así como la convergencia o la divergencia de un flujo o un material (Ayalew, L., et al, 2004).

Por otra parte la curvatura de la pendiente no solo afecta a la cantidad de lluvia que se infiltra en el suelo y la ruta de flujo del agua subterránea (Santacana, N., et al, 2003), controlando el flujo de agua dentro y fuera de las laderas (Ayalew, L., et al, 2004), sino que además influye significativamente en el grado de erosión (Di Stefano, C., et al, 2000), mismo que a su vez disminuye la estabilidad del suelo.

Ahora bien, como se menciona en el capítulo anterior, la Curvatura está compuesta por la curvatura del perfil y la curvatura planimétrica; ambas afectan la susceptibilidad de una superficie a los deslizamientos.

La curvatura del perfil influye en los esfuerzos de conducción y resistencia dentro de un deslizamiento de tierra en la dirección del movimiento, mientras que la curvatura planimétrica controla la convergencia o divergencia del material de deslizamiento y el agua en la dirección del movimiento de deslizamiento (Ohlmacher, G., 2007).

En cuanto a la geometría de la curvatura (tanto en perfil como en planta) ésta se puede dividir en tres formas: cóncavas, convexas y planas. Diversas investigaciones han demostrado que las curvaturas cóncavas o depresiones concentran tanto aguas subterráneas como superficiales, y la concentración de agua conduce a una mayor actividad de movimiento de material, por lo que este tipo de curvaturas tienen un grado mucho mayor de asociación espacial con los deslizamientos (Ghosh, S., et al, 2011; Ohlmacher, G., 2007). Aún más, existe un consenso general en que una ladera tiene una alta probabilidad de fallar cuando al menos una de sus curvaturas es cóncava, esto debido a que la topografía cóncava es un punto de colección de agua, suelo y derrubios (Ayalew, L., et al, 2004).

La forma de la ladera influencia los procesos de remoción en masa por gobernar la distribución del agua del suelo. Pendientes con curvatura convexa (en perfil y/o en planta) tienden a dispersar el agua subterránea impidiendo la formación de acumulaciones de agua, y suprimiendo el desarrollo de altas presiones de agua en los poros entre las partículas de suelo lo cual contribuye a la estabilidad de la ladera. Mientras que pendientes cóncavas tienden a desarrollar acumulaciones de agua y concentrar agua subterránea, agua superficial, sedimentos y restos orgánicos. En estas depresiones de la pendiente las fuerzas que promuevan los procesos de remoción (gravedad, presión de poro, peso del material) pueden exceder aquellas de resistencia al movimiento (Tapas, M., et al, 2010).

Así pues, la forma de la ladera juega un papel importante en la presencia y comportamiento de los deslizamientos. Existe una gran cantidad de trabajos sobre estabilidad de laderas que cuentan a la Curvatura entre sus factores determinantes de entrada para la evaluación y análisis de susceptibilidad al deslizamiento en una zona determinada debido a que el punto de inicialización de la mayoría de los deslizamientos puede ser predicho en base a la morfología de la ladera (Beguería, S., 2006; Blahut, J., et al, 2010; Doratti, M., et al, 2002; Komac, M., 2006; Pradhan, B., y Lee, S., 2009; Regmi, N., et al, 2010; Tapas, M., 2010; Van Westen, C., 2000; Van Westen, C., et al, 2008). Queda pues claro hasta aquí que la curvatura de la ladera es otro de los factores causales importantes que se deben tomar en cuenta en el estudio de deslizamientos, ya que es evidente que tal curvatura representa un elemento crítico que determina la inestabilidad de laderas (Alcántara, I., y Murillo, F., 2008; Doratti, M., et al, 2002).

3.2.4 Aspecto

La importancia de la orientación de una ladera radica, entre otras cosas, en que de ella dependen los efectos y los tipos de viento, la cantidad de luz solar que recibe a lo largo del día, la dirección de la lluvia y por lo tanto la cantidad de precipitación o humedad que puede captar, y por extensión la densidad de vegetación que posee (Alcántara, I., y Murillo, F., 2008; Yalcín, A., y Bulut, F., 2007). Eventos meteorológicos tales como los ya mencionados son parámetros que pueden controlar la formación de los deslizamientos (Magliulo, P., et al, 2008; Yalcín, A., y Bulut, F., 2007).

Dentro de la literatura diversos autores abordan la importancia de la orientación. Jiménez-Perálvarez, J. D., et al. 2009 afirma que existe una relación entre la intemperización y la orientación de una ladera; van Westen, C. J., et al, 2008, por su parte señala que en la orientación se ven reflejadas las diferencias en la humedad del suelo y la vegetación de una ladera; así mismo Nefeslioglu, H. A., 2010, menciona que la orientación influencia fuertemente la incidencia de radiación y por ende la temperatura de las laderas; por otro lado Regmi, N., et al., 2010, apunta que la insolación solar, la evo-transpiración, y la distribución y abundancia de flora y fauna, son cuestiones directamente relacionadas con la orientación; finalmente Perotto-Baldiviezo, H. L., et al., 2004, refiere que las pendientes con alta insolación y asociadas a altas temperaturas, incrementan la erosión.

Así pues, el aspecto de una ladera posee un alto potencial para influir en sus propiedades físicas y su propensión a fallar. De esta manera el aspecto u orientación de la pendiente repercute en el grado de susceptibilidad al deslizamiento que ésta pueda tener debido a la serie de procesos, como los mencionados en el párrafo anterior, que se encuentran continua y constantemente operando sobre dichas propiedades (Dai, F., et al, 2002). En consecuencia el aspecto es considerado como un factor controlador de deslizamientos, por lo que es muy frecuentemente usado en el análisis de estabilidad de laderas y en la realización de mapas de susceptibilidad al deslizamiento (Beguería, S., 2006; Blahut, J., et al, 2010, Carrara, A., et al, 1999; Carrasco, R., et al, 2003; Komac, M., 2006; Neaupane, K., y Piantanakulchai, M., 2006; Pradhan, B., y Lee, S., 2009).

3.2.5 Uso de suelo y Vegetación

La cubierta vegetal tiene una gran influencia en la estabilidad de las laderas (Alcántara, I., y Murillo, F., 2008), tal influencia puede ser explicada en función de los efectos hidrológicos y mecánicos que la vegetación produce sobre la superficie de las pendientes. Por un lado la cubierta vegetal modifica significativamente la hidrología del suelo debido al papel que juega en la intercepción de la lluvia, la infiltración y la evotranspiración, repercutiendo a su vez en la cantidad de humedad que el suelo posee (Beguería, S., 2006; Remondo, J., et al, 2003; Santacana, N., et al, 2003). Por otra parte, la vegetación contribuye en la cohesión y el reforzamiento del suelo por medio de los sistemas de raíces, en la protección de la superficie de la sobrecarga de agua y de la acometida de los vientos (Glade, T., 2003; Neaupane, K., y Piantanakulchai, M., 2006; Van Westen, C., et al, 2008).

Ahora bien, si por un lado la presencia de cubierta vegetal favorece la estabilidad de las laderas, por el otro la falta de vegetación reduce la fuerza y resistencia de los materiales de una ladera (Ghosh, S., et al, 2011). Así pues, cambios en el uso de suelo que generalmente resultan de las actividades humanas, tales como deforestación, construcción de caminos, incendios y cultivos en laderas empinadas, pueden conducir a una acelerada y severa degradación de la tierra, y a la erosión propiciando que las laderas sean más susceptibles a fenómenos tales como los deslizamientos (Alcántara, I., et al, 2006; Turkelboom, F., et al, 2008; Van Westen, C., et al, 2008).

De esta manera zonas que carecen de vegetación debido a cambios en el uso de suelo, la deforestación y las prácticas agrícolas no sostenibles resultan ser más susceptibles a la inestabilidad de laderas, lo que conlleva a un incremento en la incidencia de deslizamientos (Alcántara, I., et al, 2006; Perotto-Baldiviezo, H., et al, 2004). De igual forma la vegetación secundaria como los cultivos y los pastos resultan ser el tipo de cubierta que presenta la más alta frecuencia de deslizamientos conforme la pendiente aumenta (Perotto-Baldiviezo, H., et al, 2004; Turkelboom, F., et al, 2008).

Así pues, la cubierta vegetal es un factor importante que tiene considerable influencia sobre la ocurrencia y comportamiento de los deslizamientos, por tanto el uso de suelo es considerado como factor condicionante de deslizamientos, debido a que el tipo de uso de suelo puede afectar las condiciones y la fortaleza del suelo. (Glade, T., 2003; Van Westen, C., et al, 2003). En adición, la cubierta vegetal es uno de los factores que ha mostrando tener un buen poder predictivo dentro de los estudios de susceptibilidad al deslizamiento (Falaschi, G., et al, 2009).

3.3 Modelo para la determinación de zonas propensas a sufrir deslizamientos.

3.3.1 Metodología

En la actualidad existen diferentes métodos para evaluar la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante el empleo de sistemas de información geográfica. En este caso, dada la disponibilidad de información y la escala de trabajo, se desarrolló un modelo de susceptibilidad desde el enfoque de la evaluación indirecta (Guzzetti, F., et al, 1999; Van Westen, C., et al, 2003) por medio del uso de índices o pesos para cada factor causal.

Esta metodología permite obtener una zonificación de la susceptibilidad del terreno a desarrollar deslizamientos a partir de la valoración y la combinación de los pesos relativos de diversos factores morfodinámicos, la cual resulta fácil de implementar en un SIG.

Considerando una base de datos espacial que contenga mapas de litología, cubierta vegetal, topografía y atributos derivados (pendiente, aspecto, etc.), se puede transformar dicha base de datos multicapa en una agregación de valores funcionales para obtener un índice de propensión de la tierra a fallar (Chung, Ch., y Fabbri, A., 2003). Así pues, para la realización del modelo se estableció el uso de cinco factores causales (Pendiente, Curvatura, Aspecto, Geología y Uso de Suelo), los cuales son obtenidos de tres fuentes base: un Modelo Digital de Elevación, un Mapa Geológico Digital, y una Imagen de satélite NDVI. Es preciso señalar que toda esta información es integrada en una base de datos dentro del Sistema de Información Geográfica ArcGIS de ESRI®.

Como parte de la metodología tras la obtención e integración de los factores causales dentro del SIG, se realiza un análisis estadístico que utiliza/incorpora/empata datos de cada una de las tablas de atributos de las capas de los factores causales, con datos extraídos de un inventario de deslizamientos verificado en el municipio de Amatán, Chiapas; el cual es tomado como muestra para la realización de un análisis que permita determinar el grado de contribución a los procesos de ladera que tienen cada una de las clases en las que se dividen los distintos factores causales, así como los mismos factores.

Finalmente el modelo cargado con todas las capas de datos y pesos pertinentes se ejecuta, para obtener una zonificación que determine los sectores con diferentes niveles de propensión a presentar deslizamientos.

3.3.2 Modelo de Susceptibilidad

El modelo de susceptibilidad a deslizamientos se llevo a cabo utilizando la herramienta ModelBuilder_{MR} del Sistema de Información Geográfica ArcGIS (ESRI). El modelo propuesto se puede expresar como una suma lineal ponderada que se puede representar de la siguiente forma:

$$I = \sum_{j=1}^n w_j x_{ij}$$

En donde:

I es el índice de susceptibilidad

w_j es el peso del factor j

x_{ij} es el peso de la clase i del factor j

Para el desarrollo del modelo de susceptibilidad en primera instancia se construye, dentro de un SIG, una base de datos con los factores causales que se consideran condicionantes de la inestabilidad de laderas en la zona de estudio, los cuales ya se han mencionado en párrafos anteriores, y se homogenizan en cuanto a resolución, proyección y formato digital. Posteriormente cada factor se subdivide en clases a las que se les asigna diferentes pesos basados en análisis estadísticos y estudios previos que ayudan a determinar la influencia relativa de dichos factores en la inestabilidad de las laderas. Por último, se hace la ponderación final determinando las prioridades de acuerdo a la importancia de cada factor, y se efectúa la suma lineal ponderada que generara el mapa de susceptibilidad. En la Figura 14, se muestra el diagrama de flujo del método propuesto con las capas temáticas y los atributos topográficos, mientras que en la Figura 15, se observa la implementación del modelo dentro de la herramienta ModelBuilder_{MR} de ArcGIS.

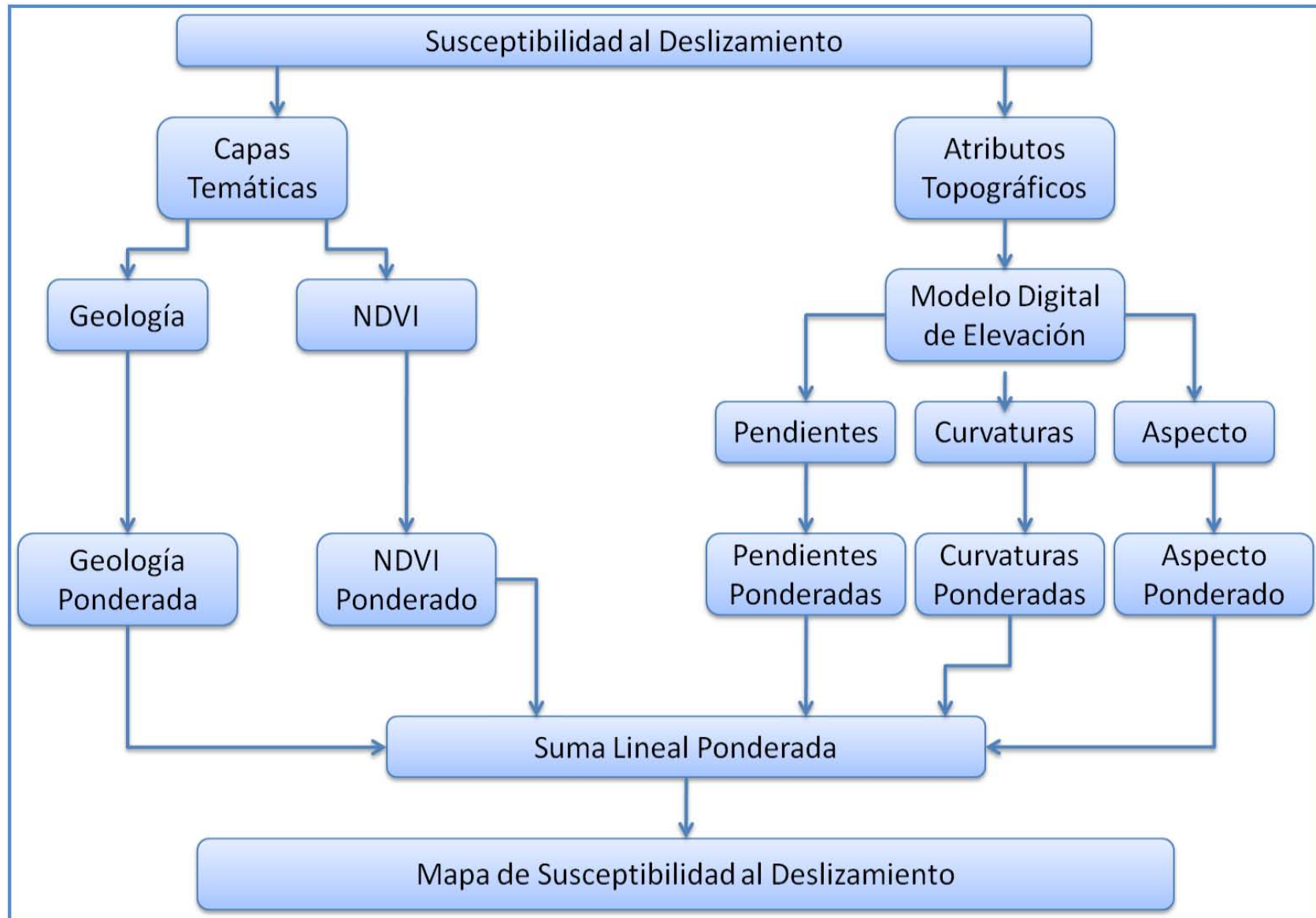


Figura 14. Diagrama de Flujo de la Metodología.

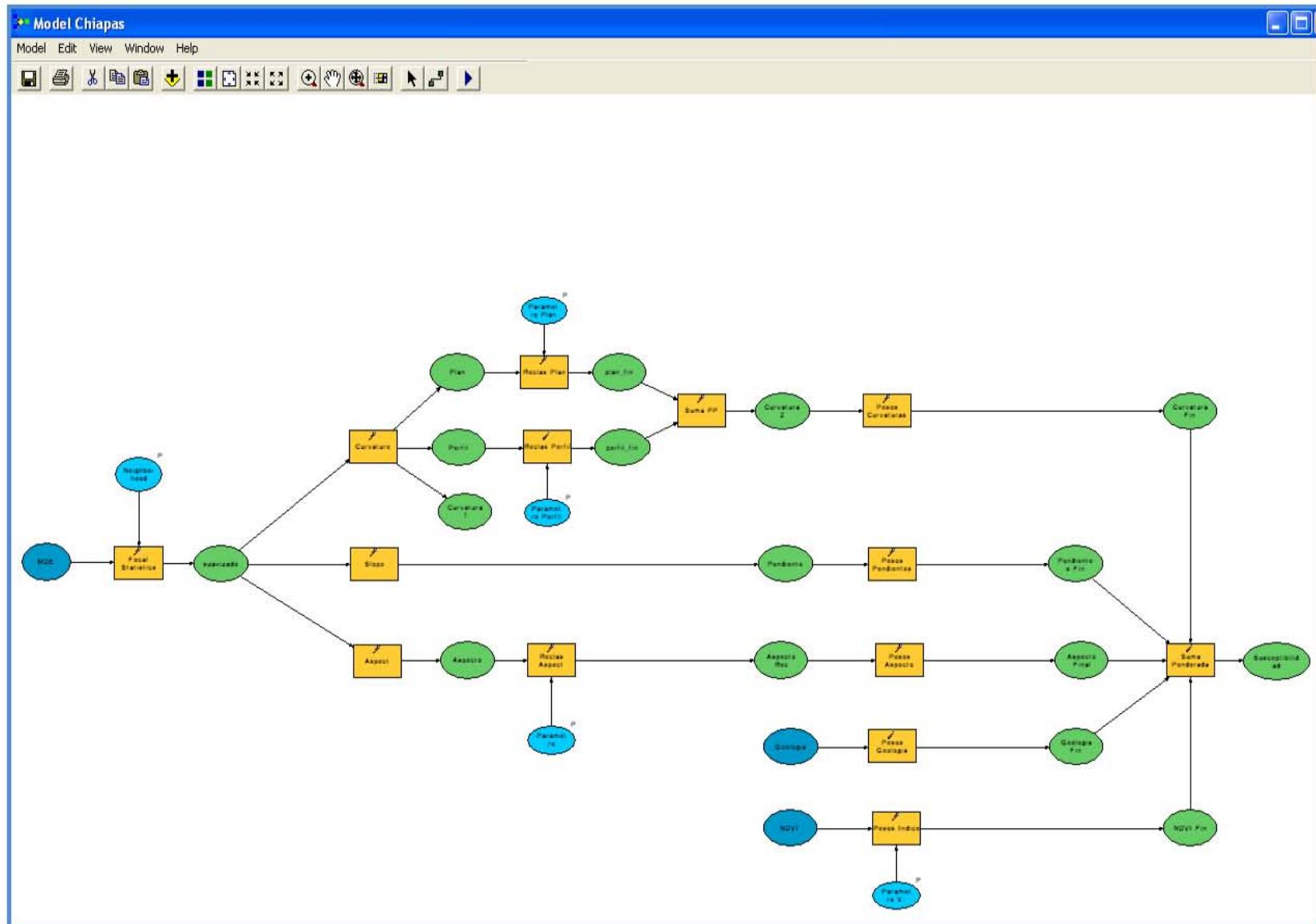


Figura 15. Modelo de Susceptibilidad a Deslizamientos.

3.3.2.1 Mapas Base

Modelo Digital de Elevaciones

El MDE se obtuvo del continuo de elevaciones mexicano CEM (2.0) del INEGI <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoElevaciones.aspx>, el cual representa las elevaciones del territorio Mexicano mediante valores espaciados en x,y por un segundo de arco (equivalente aproximadamente a 30m) y con un valor de elevación (z) para cada punto; el continuo de elevaciones está disponible en proyección latitud/longitud, por lo que una vez descargado fue necesario reproyectar la superficie que conforma la zona de estudio a la proyección UTM N15. En la Figura 16 se observa el MDE del área de estudio extraído del continuo de elevaciones; los valores de altitud más altos están representados por tonos azules mientras que los valores más bajos se ven reflejados en tonos rojos. Con la finalidad de resaltar los accidentes del terreno se ha empleado un modelo sombreado debajo de la capa de elevaciones.

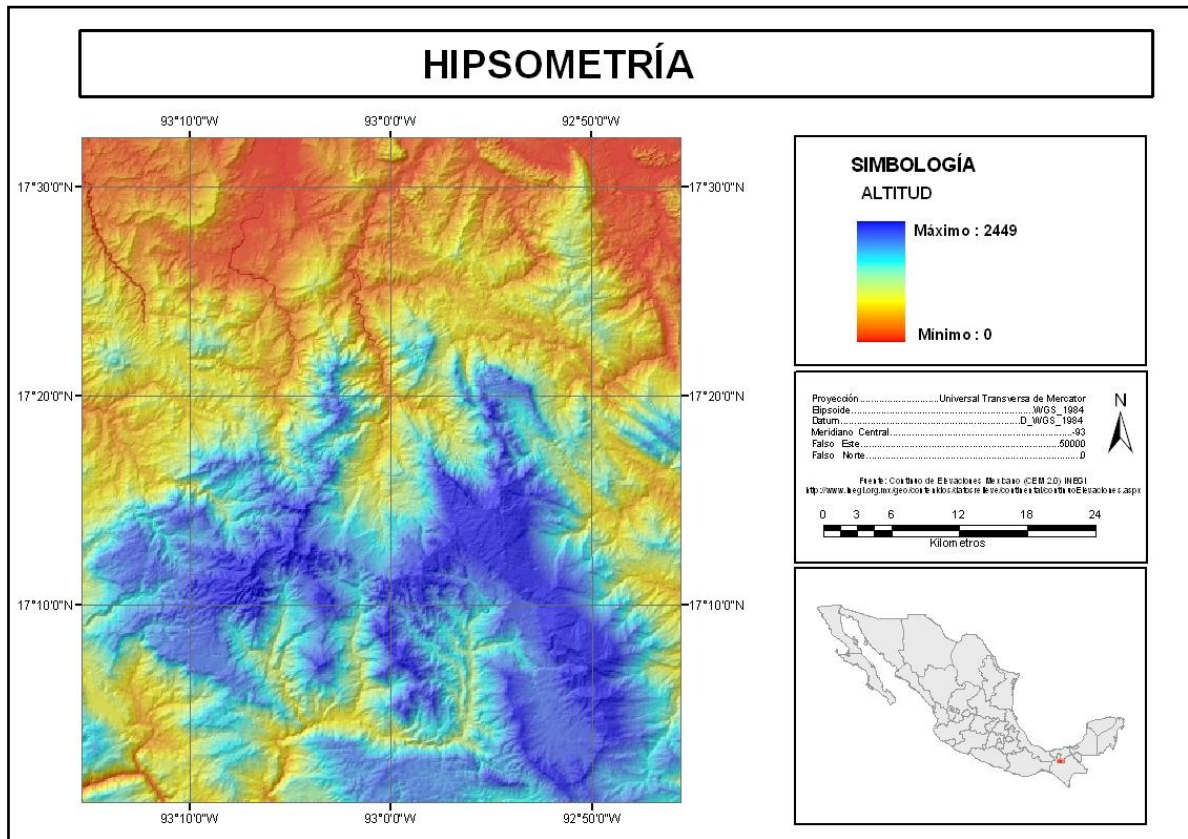


Figura 16. Modelo Digital de Elevación mostrando la hipsometría de la zona de estudio

Geología

Para la construcción del mapa geológico, se adquirieron los conjuntos de datos vectoriales a escala 1:250 000 del INEGI, y posteriormente se rasterizó la capa correspondiente al tipo de roca por génesis y edad (Figura 17).

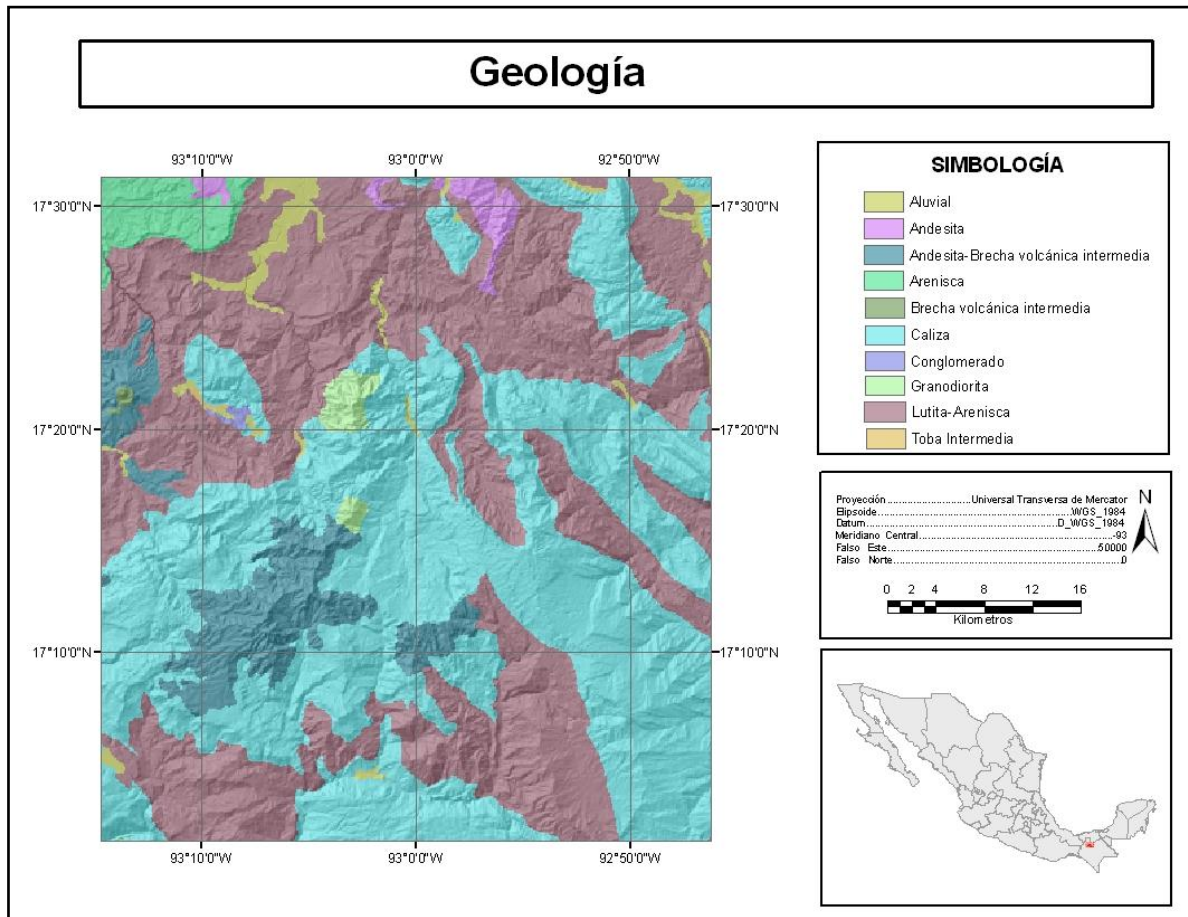


Figura 17. Mapa Geológico de la zona de estudio sobrepuesto al modelo sombreado. Fuente INEGI

En la zona de estudio predominan las litologías calizas y las lutitas-areniscas, y en menor medida encontramos Andesita-Brecha volcánica intermedia, andesita, arenisca y finalmente una muy baja distribución de aluvial, andesita, granodiorita, brecha sedimentaria, conglomerado, brecha volcánica intermedia (solo en el domo del volcán El Chichón).

NDVI

Como se ha mencionado con anterioridad, la cubierta vegetal juega un papel preponderante en el desarrollo de los deslizamientos. Los índices de vegetación obtenidos a partir de imágenes satelitales permiten cuantificar la densidad de crecimiento de dicha cubierta, lo que a su vez se puede interpretar como una ausencia o presencia de vegetación en una región determinada. Para obtener el llamado Índice de vegetación normalizado es necesario aplicar la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Es decir que el NDVI es el resultado de dividir la radiación del infrarrojo cercano menos la radiación roja, entre la radiación del infrarrojo cercano menos la radiación roja.

El NDVI es una de las más exitosas herramientas para identificar áreas con vegetación y su condición, de manera simple e instantánea (Wan, S., et al, 2010), esto gracias a que los valores del NDVI denotan áreas de vegetación en una imagen (Pradhan, B., y Youssef, A., 2010). Los valores para el NDVI son obtenidos de una imagen SPOT y el rango de estos valores es (-1, 1), los cuales indican ausencia de vegetación (-1) y presencia de cubierta vegetal (1).

La presión de poro o la superficie de escorrentía parece ser un detonador en la ocurrencia de deslizamientos. Las condiciones de la vegetación como se ha mencionado en apartados anteriores afectan la presión de poro o la superficie de escorrentía. Esta es la razón por la que el NDVI llega a ser una variable importante en la evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento (Wan, S., et al, 2010). En la Figura 18, se puede observar el NDVI de la zona de estudio.

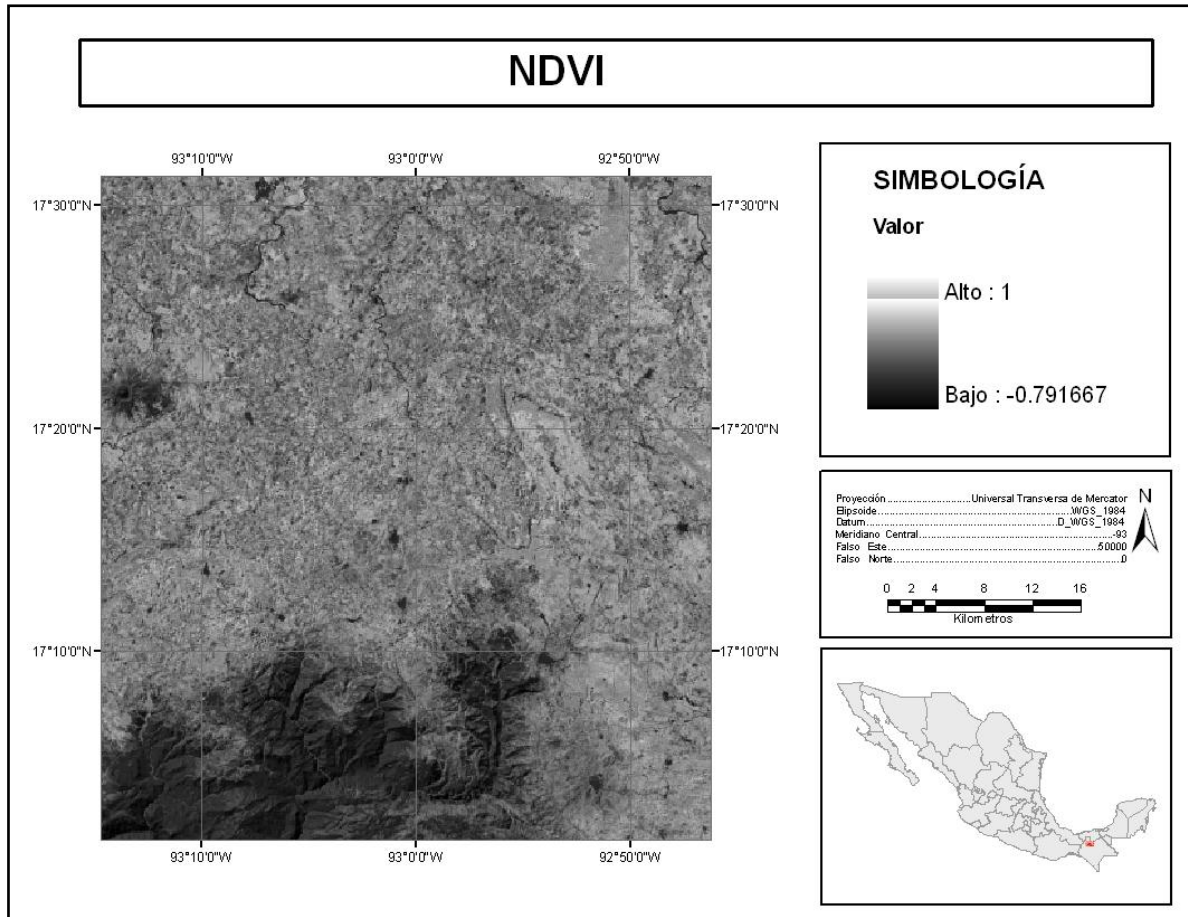


Figura 18. Índice de Vegetación Normalizado de la zona de estudio.

3.3.3 Desarrollo del Modelo

El primer paso a seguir en el desarrollo del Modelo de Susceptibilidad es extraer las capas relacionadas con la morfometría (ángulo de la pendiente) y morfología (curvatura de la pendiente y aspecto) de la zona de estudio. Como se mencionó en el capítulo anterior para lograr una exitosa extracción de atributos, parámetros o variables topográficas del Modelo Digital de Elevaciones, es recomendable aplicar un filtro que nos permita obtener valores morfométricos y morfológicos del relieve más fiables suavizando aquellos cambios bruscos o toscos que en la distribución de alturas puede tener el MDE.

De esta manera, dentro del modelo de susceptibilidad se realiza un refinamiento basado en un análisis estadístico focal dentro del SIG (Figura 19), que elimina esas asperezas en los valores de altitud por medio de un filtro promedio con un kernel circular de 5 píxeles de diámetro; el resultado es un Modelo Digital de Elevación suavizado adecuado para la obtención de variables morfométricas y morfológicas (Figura 20).

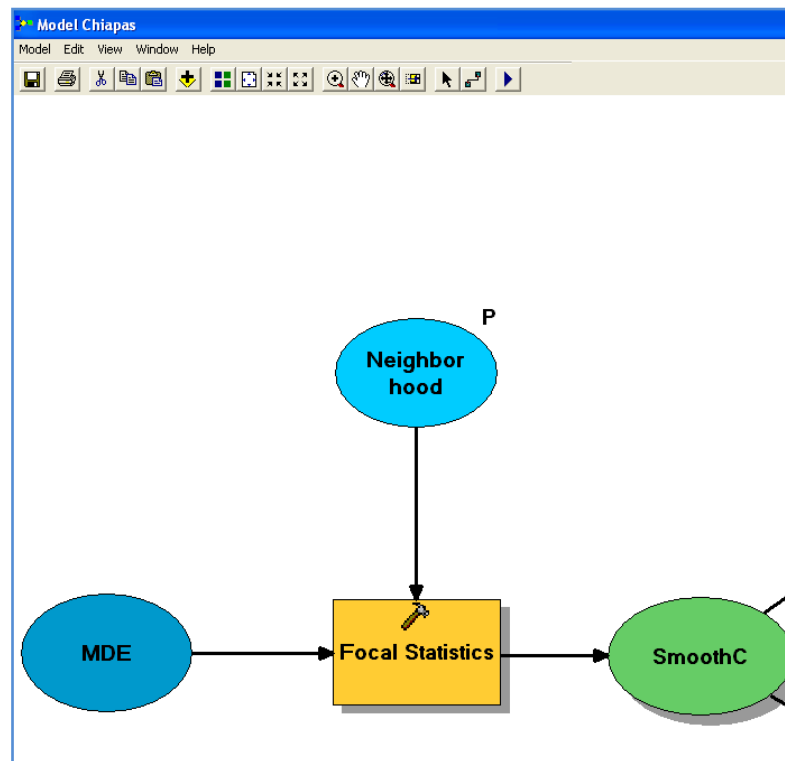


Figura 19. Obtención del MDE filtrado.

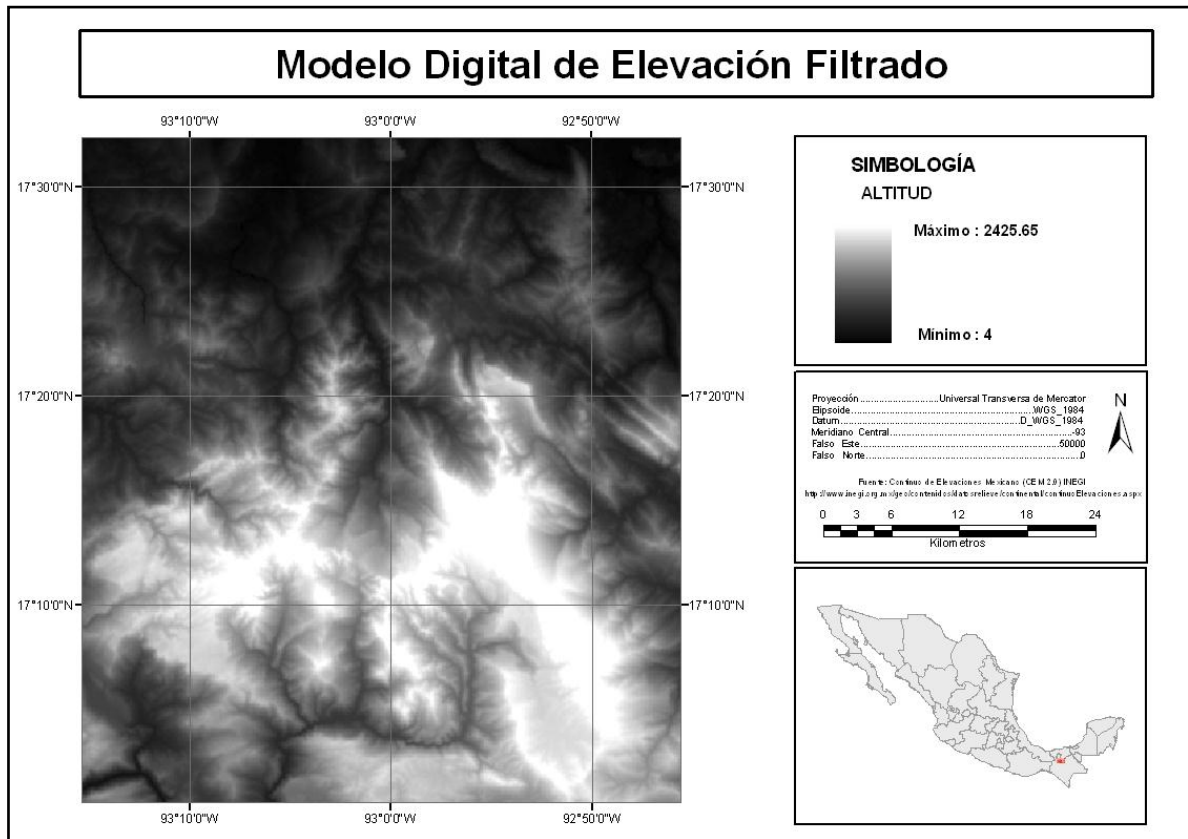


Figura 20. Modelo Digital de Elevación filtrado.

3.3.3.1 Pendientes

A continuación se obtiene la capa de Pendientes a partir del Modelo Digital de Elevación suavizado y con la ayuda de la herramienta *Slope* (Figura 21). Una vez derivada la capa las pendientes fueron reclasificadas en 10 rangos, para una mejor apreciación en el despliegue visual de este factor (Figura 22).

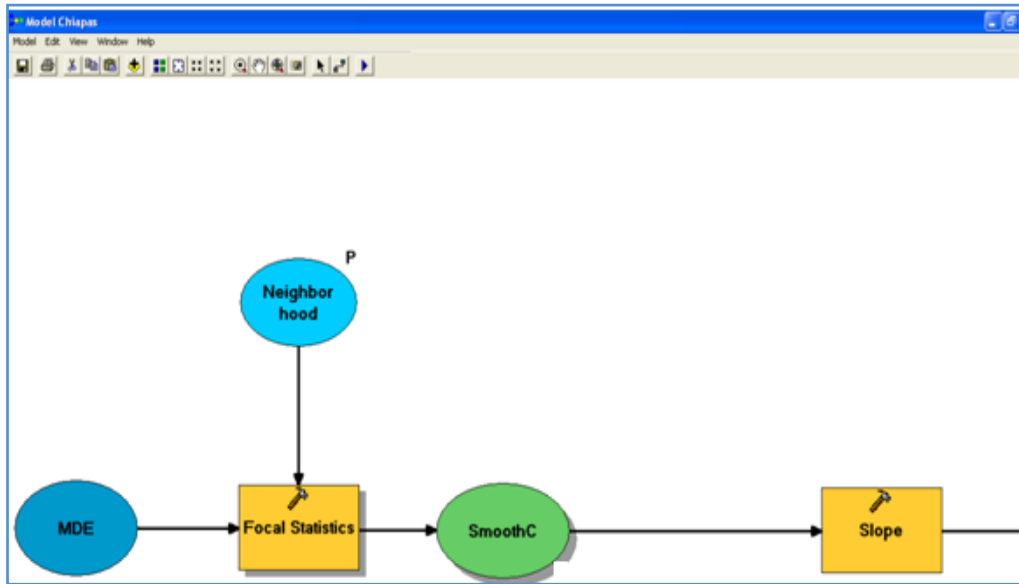


Figura 21. Obtención de la Pendiente dentro del Modelo.

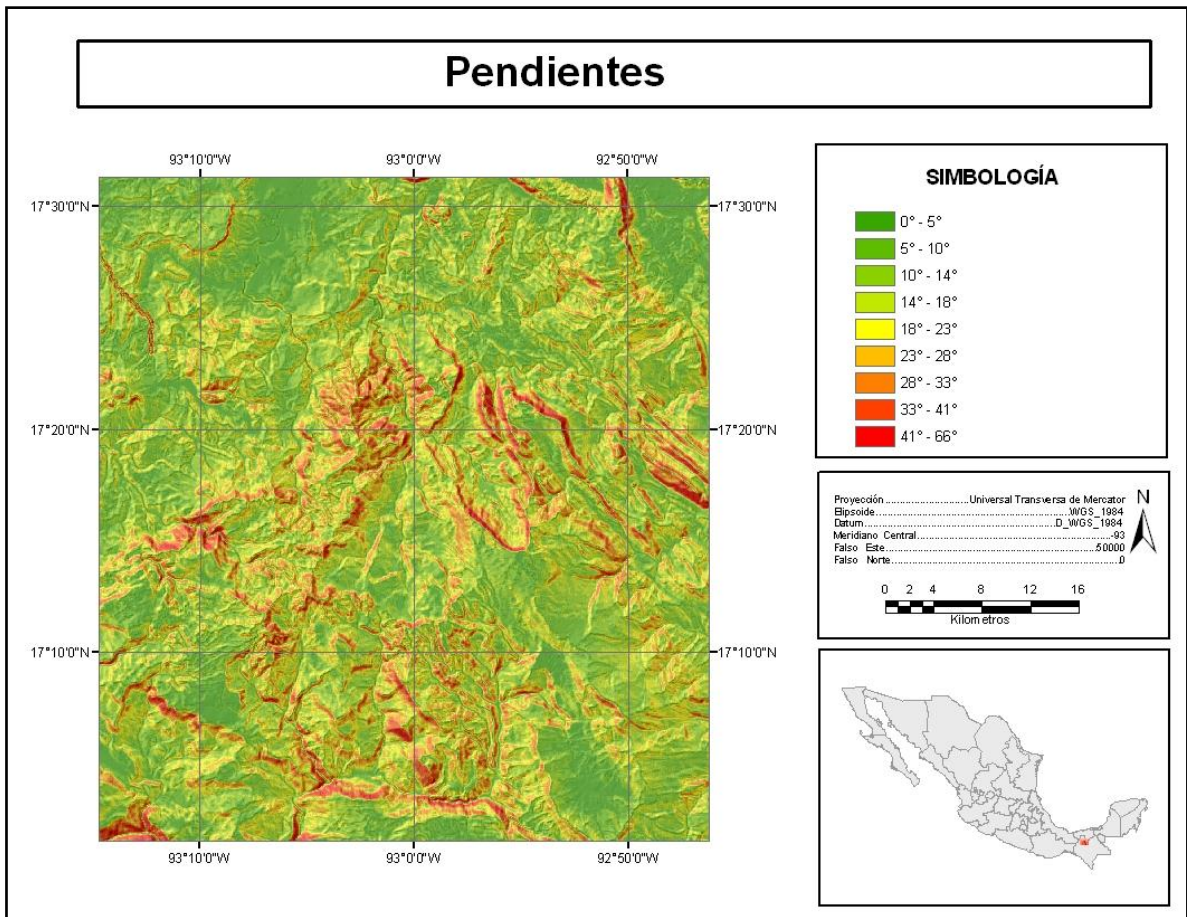


Figura 22. Mapa de Pendientes.

3.3.3.2 Curvatura

Al igual que con la Pendiente a partir del MDE suavizado se extraen, con la herramienta *Curvature*; las capas que determinan la geometría cóncava, convexa o plana de las laderas en el sentido longitudinal y transversal de la pendiente (Figura 23). El mapa final de Curvaturas, se obtiene reclasificando los perfiles planos, cóncavos y convexos en ambas direcciones y posteriormente sumándolos con la aplicación de la herramienta *Plus* para obtener las 9 combinaciones posibles de perfiles (Figura 24 y Figura 25).

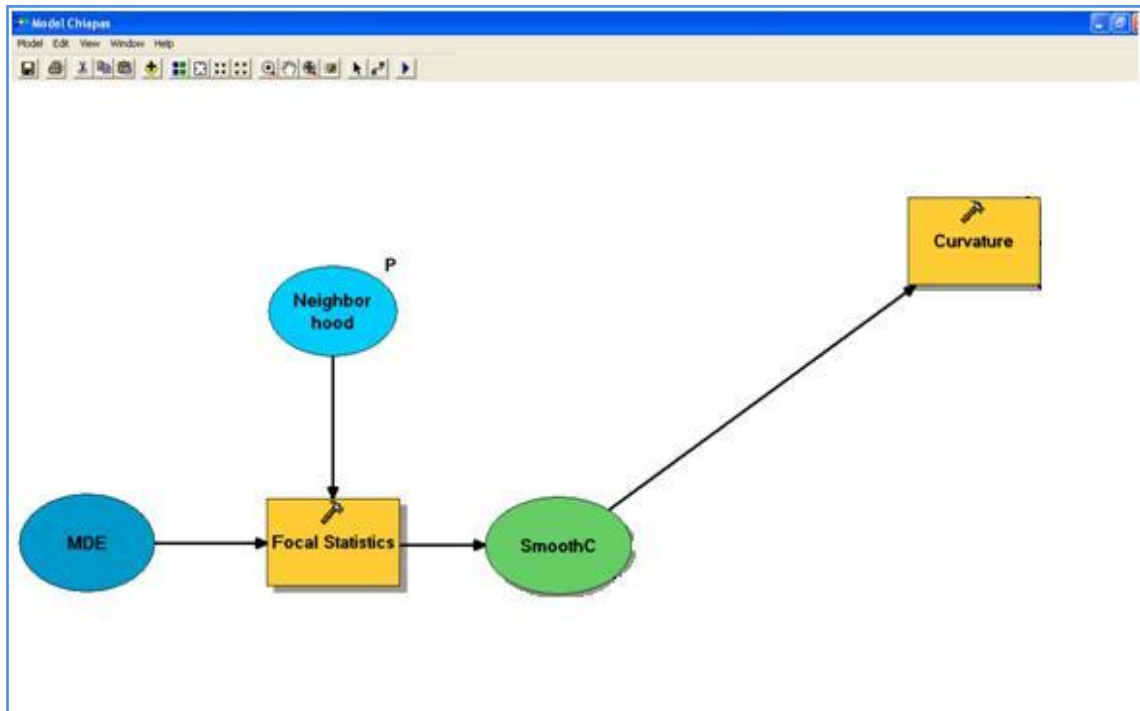


Figura 23. Obtención de la Curvatura dentro del modelo. Primer paso.

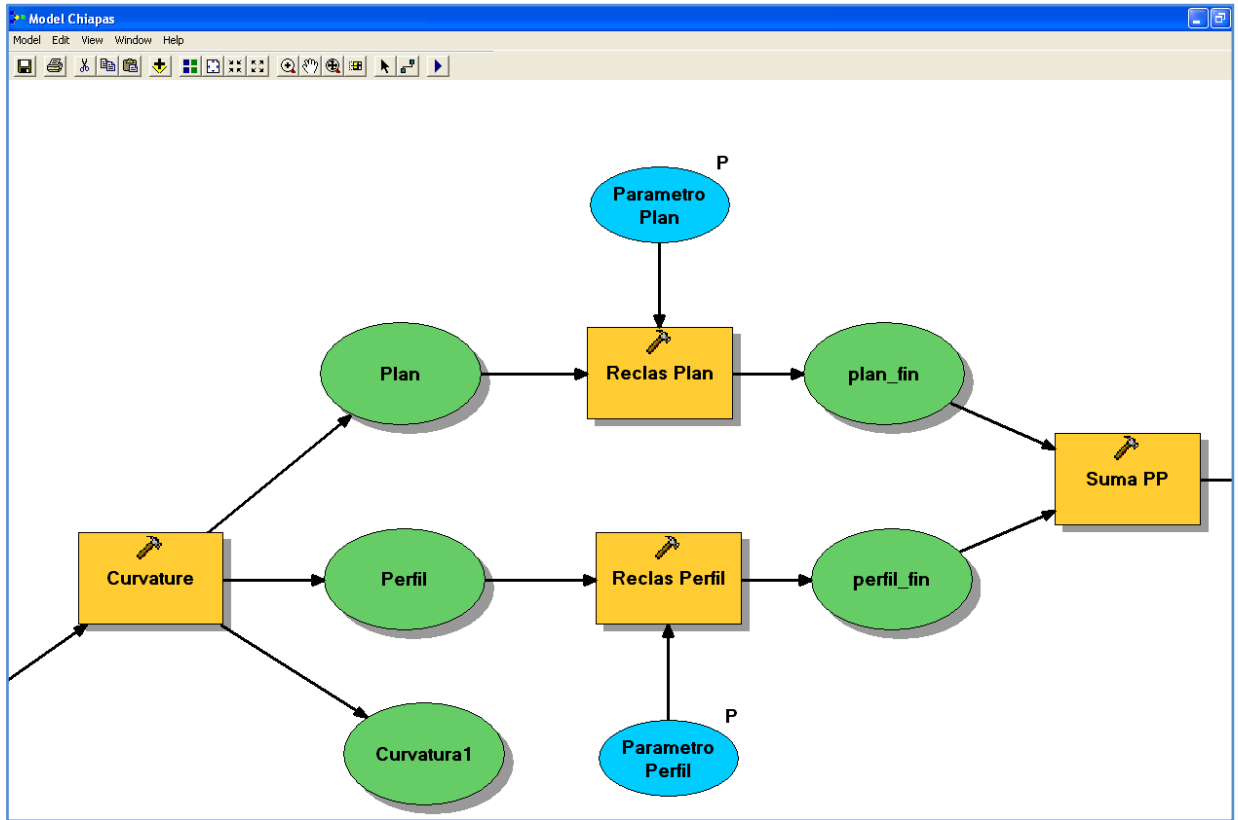


Figura 24. Obtención de la Curvatura final (Curvatura2) dentro del modelo.

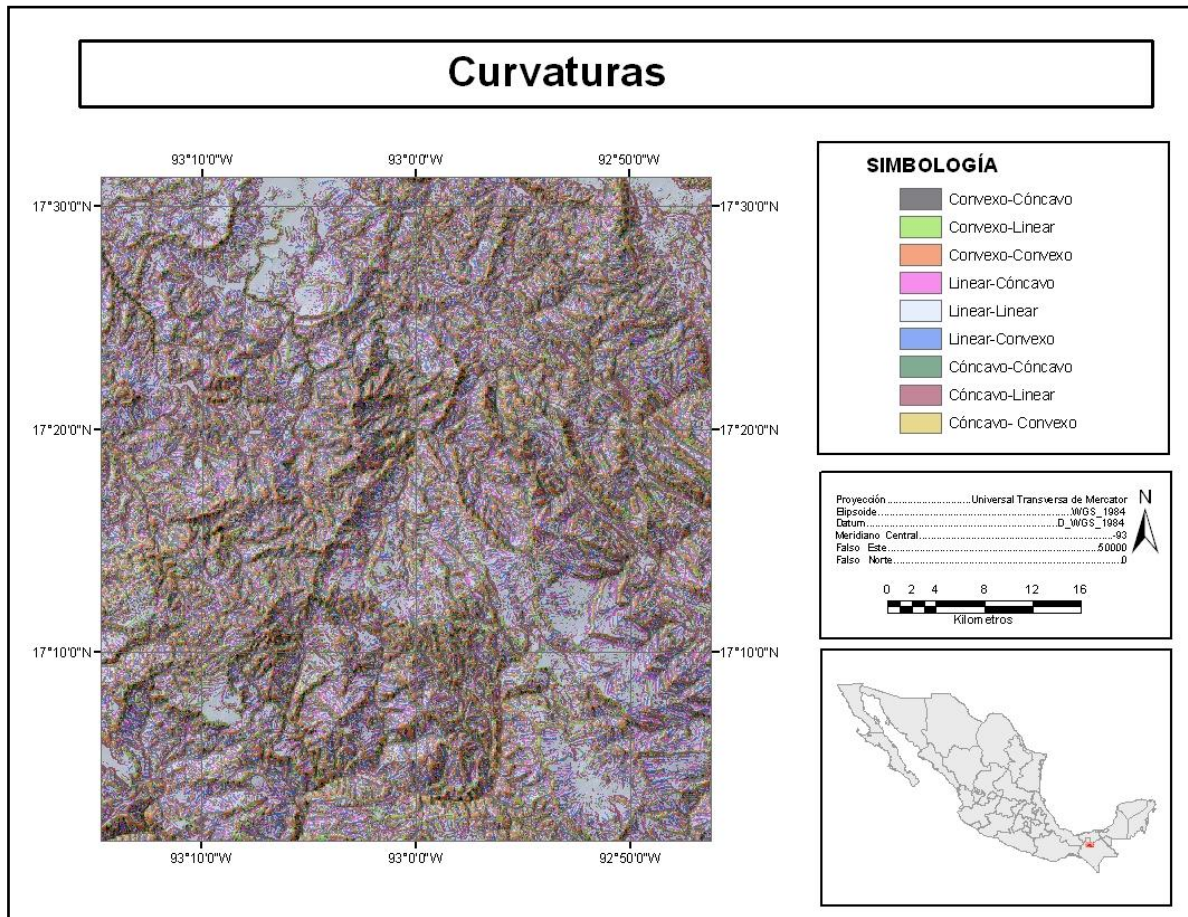


Figura 25. Mapa de Curvaturas.

3.3.3.3 Aspecto

Nuevamente partiendo del MDE suavizado, se deriva la capa de orientación de las laderas o Aspecto. Esta variable es obtenida dentro del SIG utilizando la herramienta *Aspect*, la cual da como resultado una capa que muestra las orientaciones de las laderas en rangos que dividen los cuadrantes de los puntos cardinales cada 45° , por lo que para generar una capa de Aspecto que despliegue las orientaciones en las 8 direcciones geográficas básicas y 1 orientación que refleje las zonas planas, es necesario hacer una reclasificación, obteniendo así el mapa de Aspecto (Figura 26 y Figura 27).

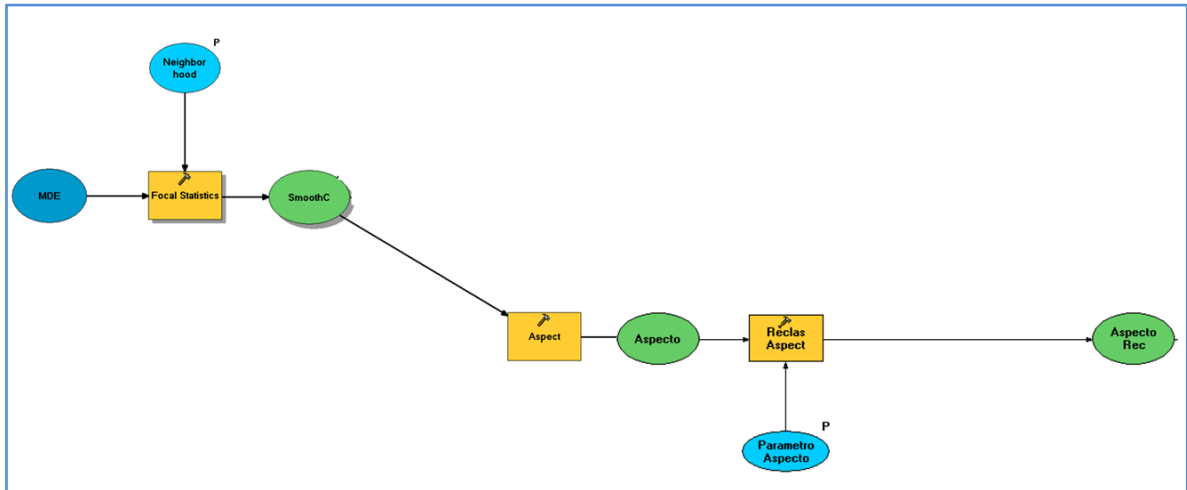


Figura 26. Obtención del Aspecto dentro del Modelo.

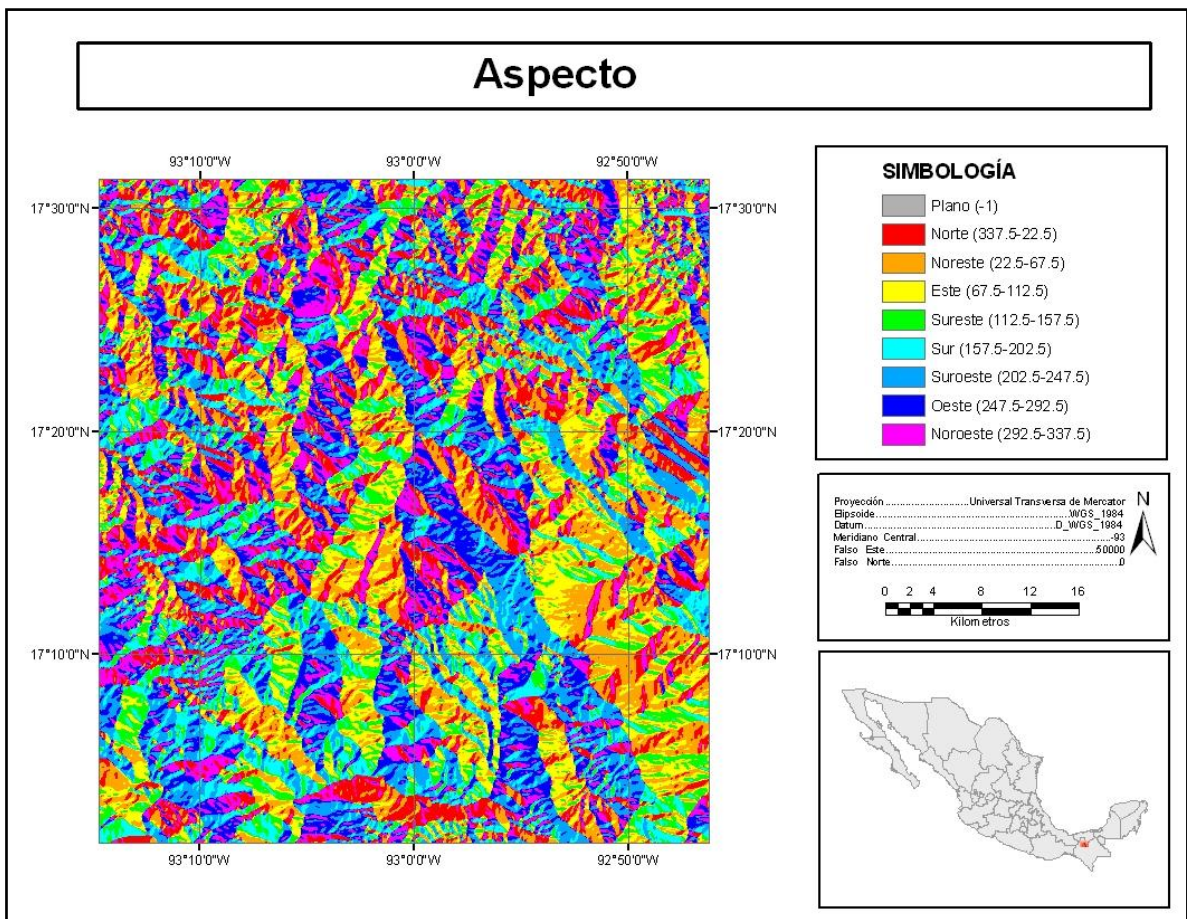


Figura 27. Mapa de Aspecto.

3.3.3.4 Geología y NDVI

El siguiente paso en el desarrollo del modelo es la incorporación al mismo de las capas temáticas de Geología y NDVI (Figura 28), mismas que posteriormente serán ponderadas junto con el resto de las variables obtenidas del Modelo Digital de Elevación.

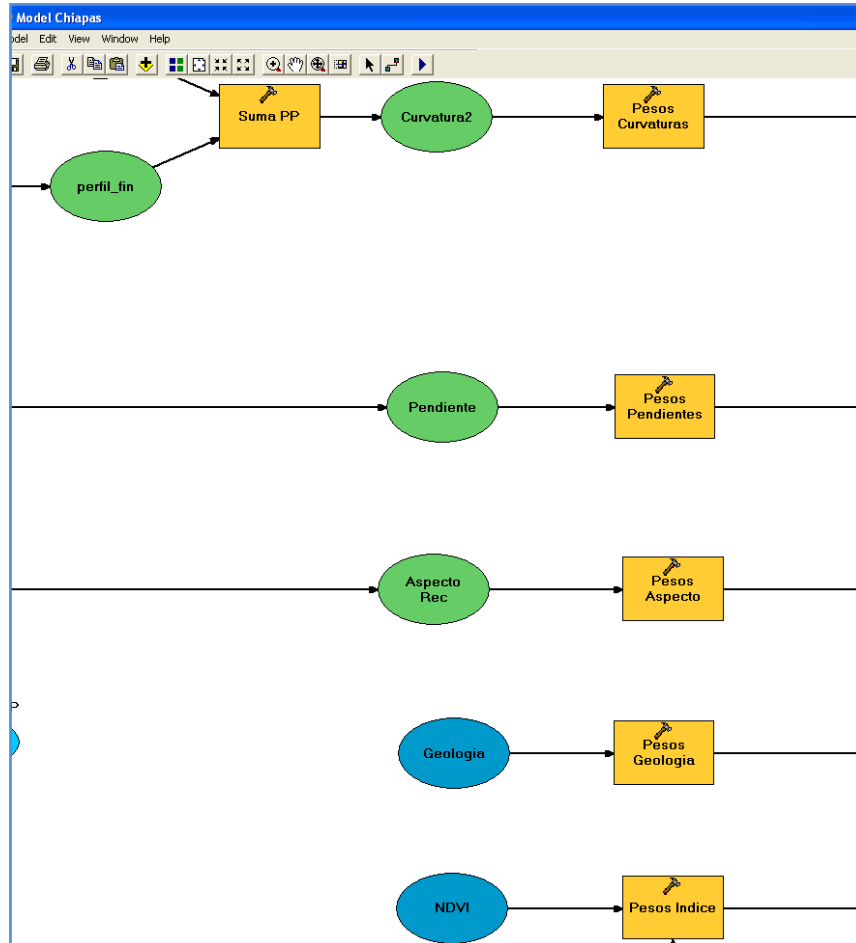


Figura 28. Incorporación de la Geología y el NDVI al Modelo.

3.3.3.5 Análisis Estadístico. Inventario de deslizamientos y Factores causales.

Como se menciona con anterioridad, para llevar a cabo una adecuada asignación de pesos a las distintas clases que conforman a los factores causales, y a estos mismos, se precisa de la realización de un análisis serio que sustente los valores que serán designados para cada una de dichas clases y factores.

De acuerdo con Guzzetti, (1999); y con Blahut, (2010) existen diversos métodos para clasificar los factores de inestabilidad de la ladera; y dentro de los más importantes propuestos en la literatura se encuentra el análisis de inventarios de deslizamientos. De hecho para varios autores (Alcántara, I., y Murillo, F., 2008; Jiménez-Perálvarez, J., et al, 2009; Li, Ch., et al, 2010; Parise, M., y Wasowski, J.,1999; Van Westen, C., et al, 2003) el inventario es un componente elemental en cualquier proyecto que intente proporcionar una adecuada evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento, ya que éste es quizás el más importante conjunto de datos en el proceso entero e influencia grandemente la calidad de los resultados finales, porque ayuda a establecer relaciones entre los distintos elementos que influyen en el desarrollo de los deslizamientos.

De esta manera, el análisis de susceptibilidad al deslizamiento usando técnicas estadísticas e inventarios de deslizamientos está basado en la evaluación de las condiciones del terreno en un área sujeta a deslizamientos previos (Carrara, A., et al, 1995). Así pues, este tipo de análisis intenta predecir patrones futuros de inestabilidad a partir de la distribución de deslizamientos pasados y bajo el supuesto de que los factores que causaron fallas de pendiente en una región son los mismos que aquellos que podrían generar deslizamientos en el futuro (Guzzetti, F., et al, 1999).

Para llevar a cabo el análisis de la influencia que tiene cada clase y cada factor causal en el desarrollo de deslizamientos en la zona de estudio, se utilizó un inventario de deslizamientos realizado en el municipio de Amatán, Chiapas (Mora, J., 2011); el cual cuenta con datos del fenómeno como son: fecha del levantamiento, nombre del punto, elevación, coordenadas, tipo de movimiento, localidad afectada, y litologías involucradas. Además del inventario de deslizamientos, para el análisis de influencia se requiere de los datos de las tablas de atributos de las capas que conforman los cinco factores causales que son tomados en cuenta para el modelo de susceptibilidad propuesto.

Como paso inicial del análisis, se cargaron todas las capas de los factores causales y las coordenadas de cada fenómeno registrado en el inventario. De esta manera se pudo sobreponer cada uno de los puntos que representan un deslizamiento en la zona muestral, con cada uno de los factores causales, logrando con esta operación una caracterización de los diversos movimientos en cuanto al tipo de pendiente, litología, aspecto, y curvatura en el que se verificaron, así como el nivel de cobertura vegetal en el que se desarrollaron.

A continuación se construyó una base de datos en Excel, a partir de la información extraída de la sobreposición de los puntos muestrales y los factores causales. Dicha base de datos quedó estructurada de la siguiente manera: Punto muestral, coordenadas, tipo de deslizamiento, pendiente, litología, curvatura, aspecto, y NDVI. Posteriormente con la ayuda de la herramienta *Análisis de Datos* se obtuvieron para cada parámetro (Factor causal) las estadísticas descriptivas básicas (Media, Mediana, Moda, Varianza, Desviación estándar, Curtosis), así como los histogramas de frecuencia. Este análisis de datos se efectuó para cada tipo de fenómeno registrado y para el total del conjunto de datos.

Finalmente con los resultados arrojados por las estadísticas descriptivas y los histogramas de frecuencia, se llevó a cabo un análisis del grado de influencia que representa cada una de las clases en las que se componen los factores causales, llegando a las siguientes observaciones en la zona muestral: para el caso de la relación entre la pendiente y los movimientos de ladera, éstos tienden a verificarse mayoritariamente en pendientes que registran ángulos de 19, 16 y 10 grados. Para el caso de las litologías en las que los deslizamientos tienden a desarrollarse más, la estadística nos indica que es en las rocas de tipo Caliza y Lutita-Arenisca, en las que predominan este tipo de fenómenos.

En cuestión a las geometrías de ladera, en la zona muestral las vertientes con curvaturas Cóncava-Cóncava, Cóncava-Linear, Linear-Convexa, así como Convexa-Convexa fueron en las que se registraron más movimientos en masa a diferencia del resto de las geometrías. Por su parte en lo referente a las orientaciones o aspecto de las laderas que son más proclives a presentar procesos gravitacionales, se observó que es en pendientes con orientación hacia el Este, Noreste, y Sureste, donde se verificaron más procesos gravitacionales. Finalmente en la relación entre el NDVI y la distribución de los deslizamientos se encontró que es en superficies con un índice de cubierta vegetal de 0.30, 0.25, y 0.20 donde se produce mayor cantidad de movimientos de ladera.

3.3.3.6 Reclasificación y Ponderación

De esta manera, a través del análisis de los resultados de la integración del inventario de deslizamientos con las capas de los factores causales, del análisis de las estadísticas descriptivas y de los histogramas de frecuencia tanto del área completa como del sector muestra, así como de los razonamientos y consideraciones hechas respecto a las

características de la zona, se establecieron los pesos convenientes para los cinco factores causales que son considerados en el modelo de susceptibilidad propuesto, y para cada una de las clases que los componen, una vez determinados tales pesos se procede a cargar sus valores en los comandos o herramientas correspondientes para continuar con el desarrollo de este modelo.

Pendiente

En función del análisis de las estadísticas descriptivas básicas y del histograma de frecuencias de este factor, y de acuerdo con su nivel de contribución en los procesos de ladera, se realizó, con la ayuda de la herramienta *Reclassify*, una nueva reclasificación de las pendientes y se asignó un valor numérico entero para cada una de las clases definidas (Figura 29 y Tabla 2) de esta manera se obtuvieron las Pendientes ponderadas. Cabe señalar que los intervalos en las clases no son constantes, debido a que la distribución y frecuencia de los valores de las pendientes, no son homogéneas.

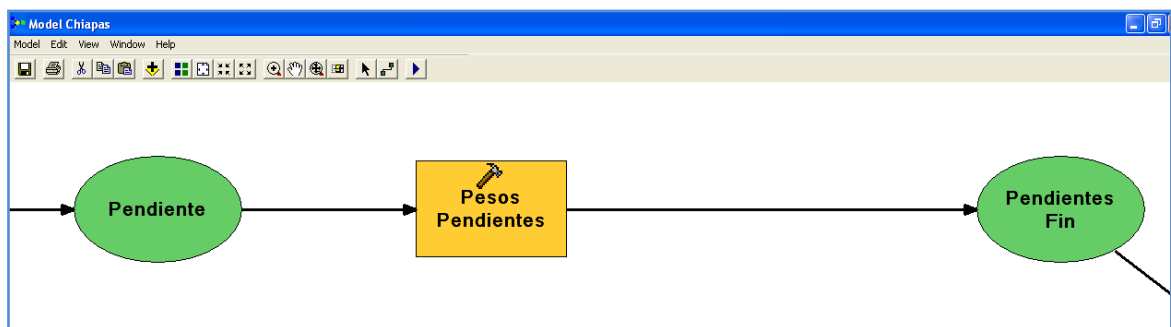


Figura 29. Obtención de Pendientes Ponderadas dentro del Modelo.

Clases de Pendiente	Pesos
0° - 5°	1
5° - 9°	1
9° - 11°	2
11° - 13°	3
13° - 17°	4
17° - 22°	5
22° - 25°	6
25° - 30°	7
30° - 35°	8
35° - 40°	9
40° - 46°	10
> 46°	10

Tabla 2. Ponderación Pendientes.

Curvatura

Para el caso del factor Curvatura, la ponderación de las diversas clases que lo integran se hace a partir de una reclasificación del Mapa de Curvaturas (Curvatura2 dentro del modelo), para asignar valores numéricos enteros que indiquen el peso que tiene cada tipo de curvatura en el desarrollo de deslizamientos (Figura 30). De acuerdo con lo anterior, el Mapa de Curvaturas de la zona de estudio se reclasifica de manera tal que los mayores valores correspondan a las geometrías de ladera más proclives a desarrollar deslizamientos (Tabla 3).

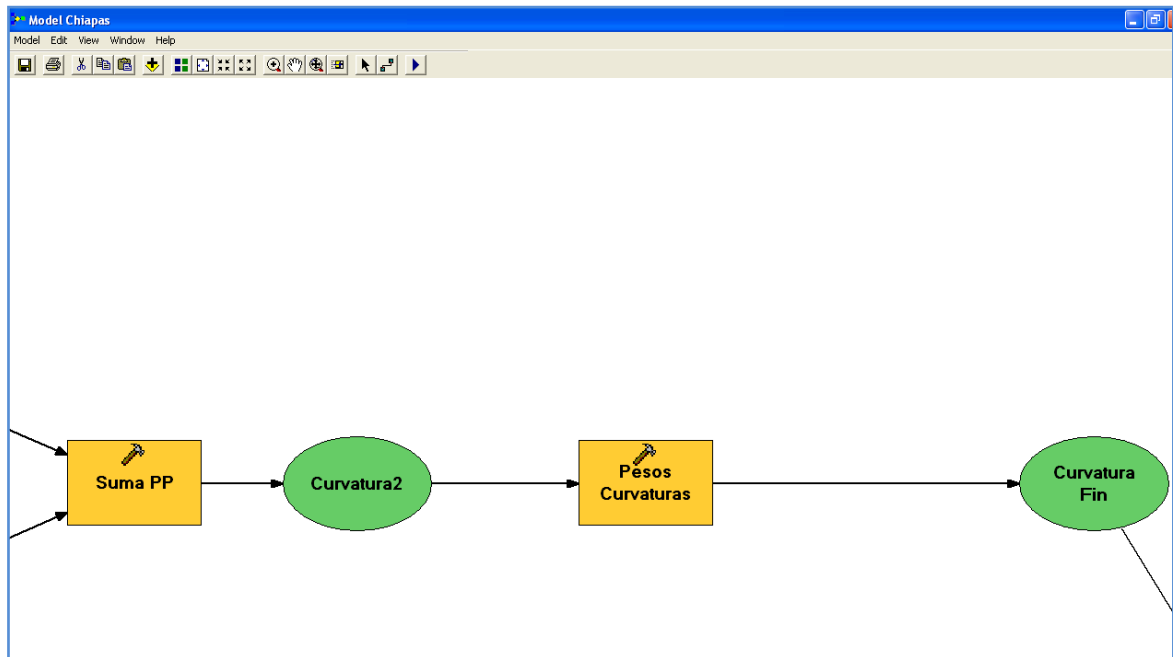


Figura 30. Obtención de Curvaturas Ponderadas dentro del Modelo.

Curvaturas	Pesos
Convexo – Cóncavo	1
Convexo – Linear	2
Convexo – Convexo	8
Linear – Cóncavo	3
Linear – Linear	7
Linear – Convexo	5
Cóncavo – Cóncavo	9
Cóncavo – Linear	6
Cóncavo - Convexo	4

Tabla 3. Ponderación Curvaturas.

Aspecto

De manera semejante a los casos anteriores, para determinar los pesos de las clases que componen el factor en cuestión, se lleva a cabo, con la aplicación de la herramienta *Reclassify*, una reclasificación del Mapa de Aspecto dentro de la que se asignan valores numéricos enteros a cada orientación de las laderas de acuerdo con su predisposición a desarrollar procesos gravitacionales (Figura 31 y Tabla 4).

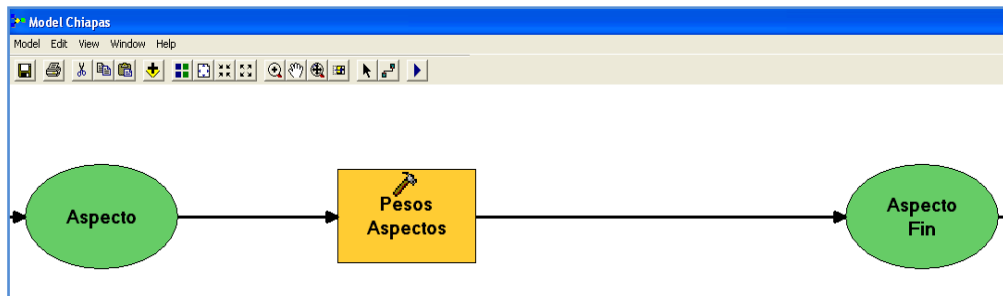


Figura 31. Obtención de Aspectos Ponderados dentro del Modelo.

Orientaciones	Pesos
Plano	1
Norte	6
Noreste	8
Este	9
Sureste	7
Sur	5
Suroeste	4
Oeste	3
Noroeste	2

Tabla 4. Ponderación Aspecto.

Geología

La reclasificación de las distintas litologías que integran la geología de la zona de estudio fue hecha en función tanto de los resultados arrojados por el análisis estadístico como de las características físicas que posee cada tipo de roca. En otras palabras, los criterios usados para ponderar la geología del área bajo estudio, toman en consideración aspectos como: constitución de la roca, es decir, si es una roca de naturaleza masiva o foliada; cohesión de los materiales que la componen (si son materiales cementados o no); y finalmente permeabilidad, es decir, que tan tendientes a filtrar y/o retener agua son. De esta manera, es como en el proceso de reclasificación a los distintos tipos de litologías presentes en la zona de estudio se les asignó un valor que indique el peso que tiene cada una en el desarrollo de deslizamientos (Figura 32 y Tabla 5).

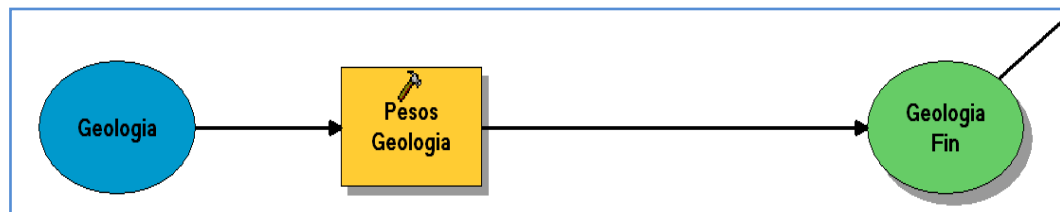


Figura 32. Obtención de Litologías Ponderadas dentro del Modelo.

Litologías	Pesos
Aluvial	1
Andesita	2
Andesita – Brecha volcánica intermedia	4
Arenisca	8
Brecha Sedimentaria	7
Brecha volcánica intermedia	5
Caliza	10
Conglomerado	6
Granodiorita	3
Lutita – Arenisca	9
Toba intermedia	2

Tabla 5. Ponderación Geología

NDVI

En último lugar, se lleva a cabo la reclasificación de la capa del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), nuevamente con el apoyo de la herramienta *Reclassify*, para asignar los valores de ponderación que indiquen el grado de contribución que tiene cada una de las clases en las que se encuentra integrado este factor, a la hora de que un deslizamiento se origina (Figura 33 y Tabla 6).

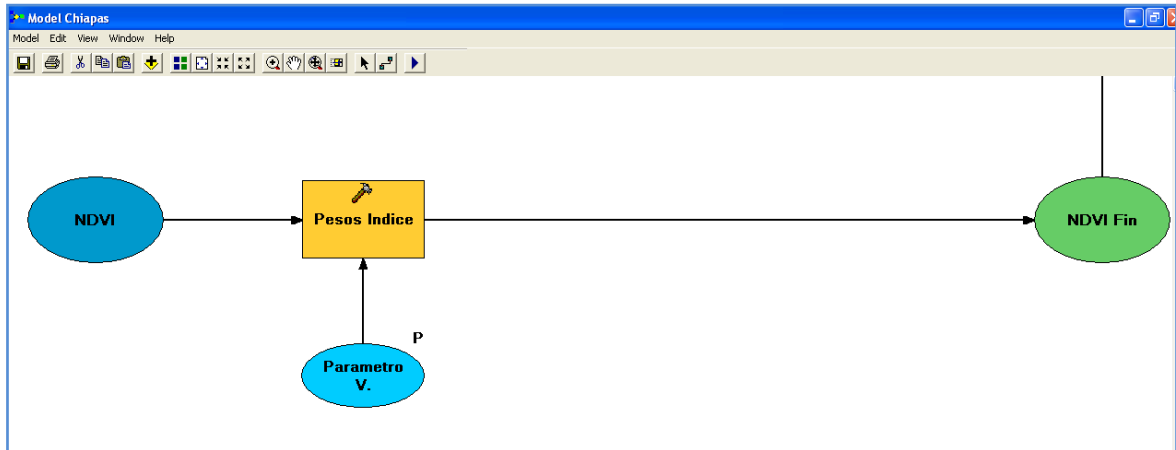


Figura 33. Obtención del NDVI Ponderado dentro del Modelo

Índice de Vegetación	Pesos
1 - .80	1
.80 - .60	2
.60 - .50	3
.50 - .30	4
.30 - .20	5
.20 - 0	6
0 - -.20	7
-.20 - -.40	8
-.40 - -.60	9
-.60 - -.80	10

Tabla 6. Ponderación NDVI.

El siguiente paso dentro del modelo de susceptibilidad es la ponderación de los factores causales utilizados en la elaboración del modelo. Para la asignación de pesos a dichos factores fueron tomados en cuenta diversos criterios, en primera instancia se consideraron los resultados del análisis estadístico; en segundo lugar se revisó una amplia cantidad de trabajos, realizados en distintos paisajes, sobre susceptibilidad a deslizamientos (Alcántara, I., y Borja, R., 2004; Ayanew, T., y Barbieri, G., 2005; Castellanos, E., y Van Westen, C., 2008; Falaschi, F., et al, 2009; Ghosh, S., et al, 2011; Glade, T., 2003; Neuhaüser, B., y Terhorst, B., 2007; Perotto-Baldiviezo, H., et al, 2004; Plaza, et al, 2005; Pradhan, B., 2010; Regmi, N., et al, 2010; Turkelboom, F., et al, 2008; Van Westen, C., et al, 2008), la mayoría de los cuales coinciden en el grado de importancia o nivel de contribución a los procesos de ladera que tienen factores como los que en este trabajo se manejan.

Finalmente se tomo en consideración el criterio de la trascendencia o significación que tiene el Factor Curvatura en el desarrollo de deslizamientos. Esto último en el sentido de que la utilización de este factor, es parte de la aportación que brinda el modelo de susceptibilidad propuesto en este trabajo.

La asignación de pesos a los cinco factores causales dentro del modelo de susceptibilidad se lleva acabo cargando los valores en la herramienta *Weight Sum*, misma que, tras una serie de operaciones al interior del SIG, nos dará como capa de salida el mapa que muestre las porciones de la zona de estudio con diferentes niveles de susceptibilidad al deslizamiento (Figura 34). Cabe señalar que los pesos asignados a los factores están representados por valores numéricos pequeños con la finalidad de que el mapa de salida no arroje valores de susceptibilidad exorbitantes (Tabla 7).

De esta manera, el modelo queda conformado en su totalidad y solo es necesario, como parte final de su implementación y antes de iniciar su ejecución general, realizar una validación, al interior del mismo con el comando *Validate Entire Model*, que verifica toda la información que contiene (capas, rangos, clases, y pesos cargados).

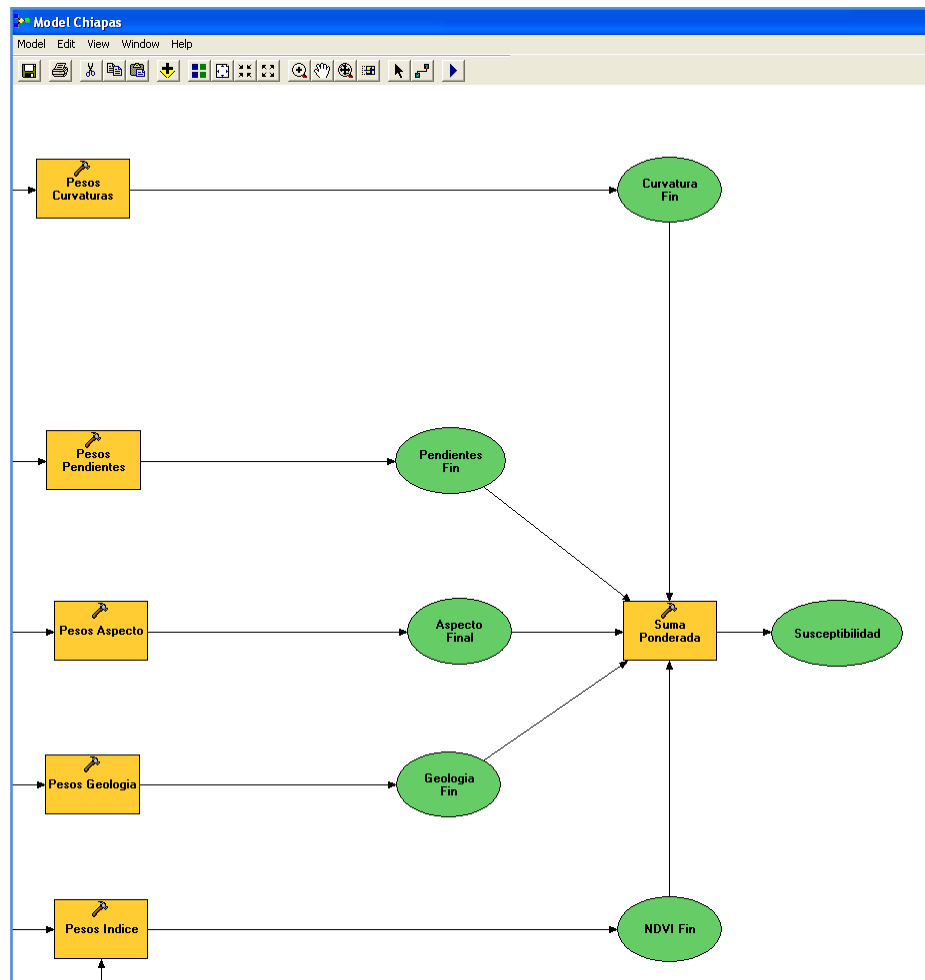


Figura 34. Ponderación de Factores y Suma Ponderada.

Factor Causal	Peso
Pendiente	1.5
Curvatura	2
Geología	1
Aspecto	.5
NDVI	1

Tabla 7. Ponderación de Factores Causales.

4 Resultados y Discusión

4.1 Resultados

A continuación se presenta el análisis de cada uno de los mapas de salida que se obtuvieron tras la ponderación y reclasificación de todos los factores causales que integran el modelo de susceptibilidad y que, como se recordará, en la fase final de éste, fueron utilizados para determinar la susceptibilidad a los deslizamientos dentro del SIG con la ayuda de la herramienta *weight sum*. De la misma forma se presenta un análisis del resultado final, es decir, del mapa de susceptibilidad que arrojó el modelo, así como de la zonificación que fue hecha a partir de dicho mapa, para delimitar áreas con distintos niveles de susceptibilidad.

4.1.1 Pendientes Ponderadas

En la Figura 35 que se presenta en la siguiente página se puede observar el Mapa de Pendientes Ponderadas, en este mapa es posible visualizar la distribución de las pendientes en función del valor y el peso que tienen con respecto a su grado de contribución en el desarrollo de procesos de ladera.

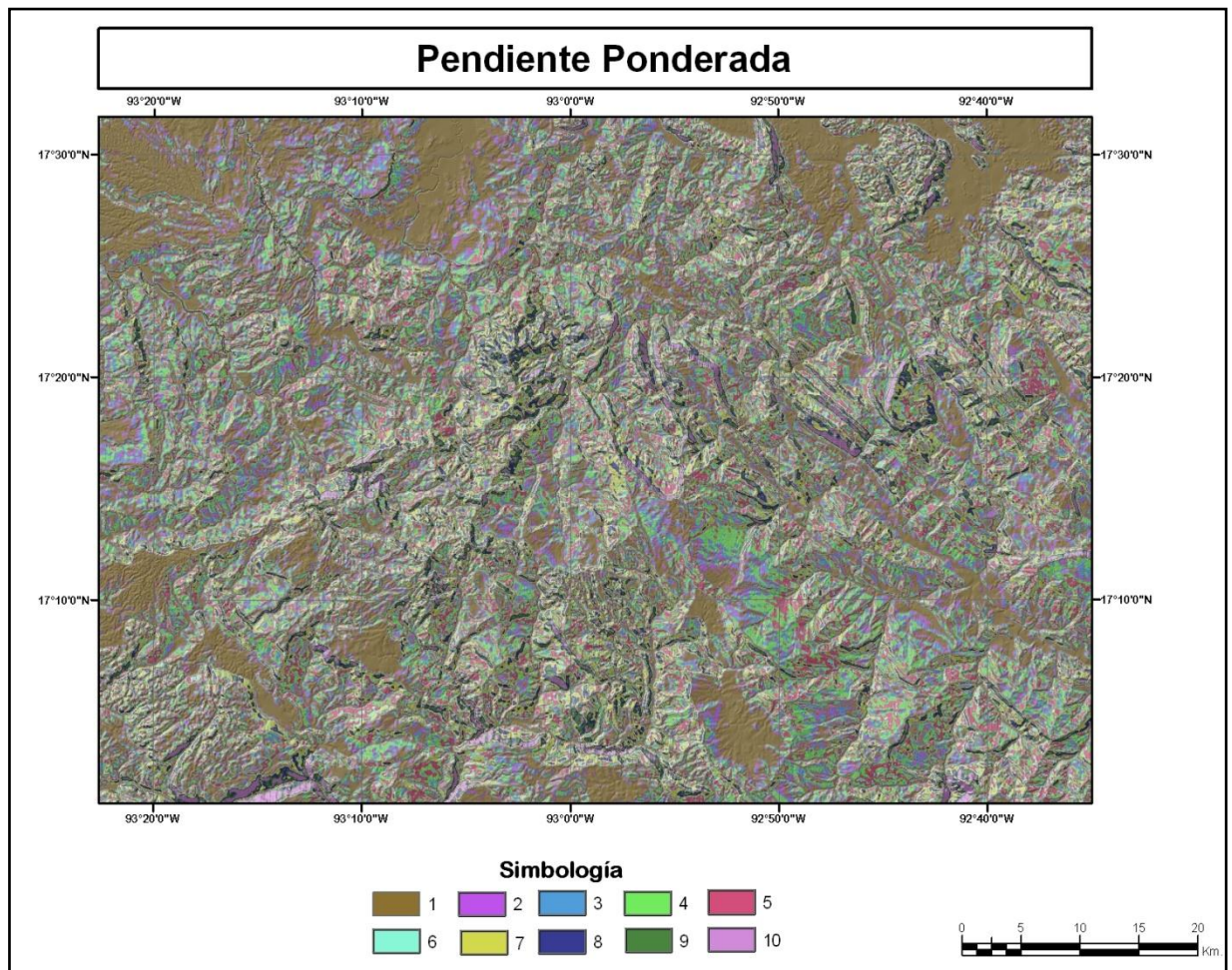


Figura 35. Mapa de Pendientes Ponderadas

Enseguida se presenta una gráfica (Figura 36) con el histograma de frecuencias de las pendientes ponderadas, el cual denota qué tipo de pesos y por lo tanto ángulos de pendiente son los más predominantes en la zona de estudio, así mismo se hace una descripción de la distribución de dichas pendientes.

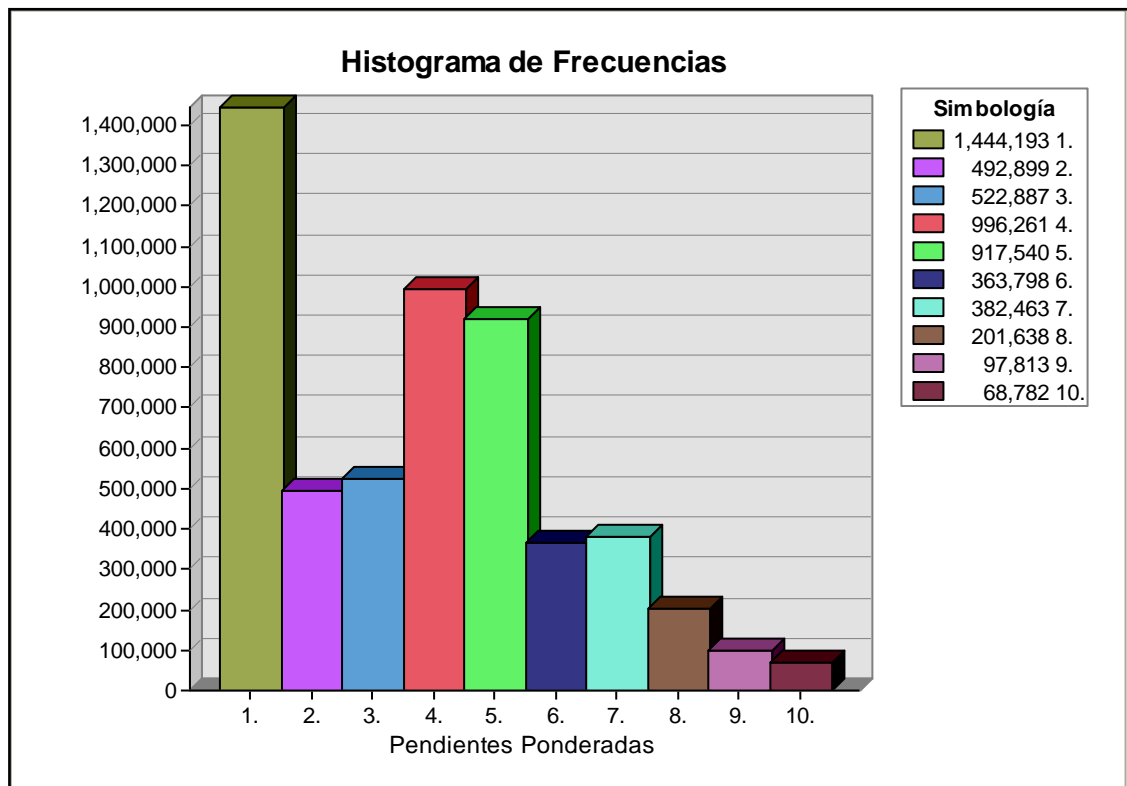


Figura 36. Histograma de Frecuencias de las Pendientes Ponderadas.

Distribución

Las áreas ocupadas por pendientes de un valor de peso igual a 1, y con ángulos de inclinación que están en un rango que va de 0° a 9° , se encuentran ampliamente distribuidas en las porciones Norte, NNE, NNW y SSW, y su presencia disminuye sin dejar de ser sustancial hacia

los sectores Oeste, Sur, SSE y Este, para llegar a ser casi mínima/más reducida en el área central de la zona de estudio. En cuanto a las pendientes con peso de valor 2, y 3, y con rangos en el ángulo de 9° a 11° , y 11° a 13° , respectivamente, éstas se encuentran distribuidas en igual proporción en prácticamente toda la zona de estudio, con excepción de porciones de extensión notable en los sectores Norte, NNE, NNW, SWW, y SSE, donde su presencia es nula.

La distribución de las pendientes con un peso de 4, al que corresponde un rango en el ángulo de 13° a 17° , tiene una presencia homogénea en prácticamente toda la zona de estudio, salvo en los sectores Norte, NNE, NNW, SWW, y SSE, pero a diferencia de las pendientes con valores de 2 y 3, estas con valor de 4, se encuentran más ampliamente distribuidas, es decir, existe una mayor superficie con este valor.

Por otra parte, las pendientes con un rango en el ángulo de 17° a 22° y un peso de valor 5, presentan una distribución que se concentra de manera considerable en los sectores Central, Este, Sur, NEE, SEE; la presencia de estas pendientes decrece aunque no de forma radical en las zonas SW y Oeste, para terminar siendo prácticamente mínima en las porciones Norte, NNE, NNW, SWW y SSE. Cabe señalar que contrario a lo que de la imagen se pudiera interpretar, las pendientes con peso de valor 5, presentan una extensión un tanto menor que las pendientes con peso de valor 4.

En lo que respecta a la distribución de las pendientes con un peso de valor 6, y al que le corresponde un rango en el ángulo de 22° a 25° , la presencia de éstas se reduce drásticamente en comparación, por ejemplo, con la superficie ocupada por las pendientes con peso de valor 5.

Las pendientes de peso 6, se encuentran en prácticamente toda la zona de estudio, sin embargo las áreas donde existe una alta concentración de ellas son el sector Centro, Centro sur, Centro norte, así como en la parte Este y NEE; una proporción menor de estas pendientes se puede observar en las direcciones SE, SW, y Oeste; y, finalmente solo superficies aisladas con estas pendientes en las zonas NNW, NW, NNE, NE, SSE, y SWW.

Para el caso de las pendientes en un rango de ángulo de 25° a 30° , y con un peso de valor 7, es posible observar que su distribución es sumamente similar a la de las pendientes con peso de valor 6, es decir, sus zonas de mayor densidad están en los sectores Centro, Centro Sur, Centro Norte, Este y NEE; mientras que las áreas con una menor concentración son la SE, SW, y Oeste, para terminar con las regiones NNW, NW, NNE, NE, SSE, y SWW, donde su presencia es escasa. No obstante, las similitudes entre las pendientes de valor 6 y 7, es también evidente que la superficie ocupada por las pendientes con valor 7 es un tanto mayor que las de valor 6.

En cuanto a las pendientes a las que corresponde un valor de 8 y un rango en el ángulo de 30° a 35° , estas presentan una distribución que refleja una alta concentración en las zonas Centro Norte, Centro Sur, y Este; en tanto que dicha concentración se reduce hacia los sectores SW, SE, y NE, hasta llegar a ser mínima en las regiones Oeste, NW, y Norte. Finalmente para las pendientes con pesos de valor 9 y 10, y con ángulos de inclinación que tienen rangos que van de 35° a 40° , y $>40^{\circ}$, respectivamente, se puede determinar la siguiente distribución: en ambos casos la presencia de estas pendientes se concentra en regiones pequeñas dentro de los sectores Este, SSW, Centro Norte, y Centro Oeste; mientras que áreas poco extensas pero bien definidas en los extremos de la zona de estudio en la porción Norte, NNE, SEE y SE, están ocupadas por dichas pendientes.

4.1.2 Curvaturas Ponderadas

A continuación se despliega el Mapa de Curvaturas Ponderadas (Figura 37), y el histograma de Frecuencias (Figura 38) obtenido del modelo de susceptibilidad, el cual muestra la distribución de las curvaturas de acuerdo con el peso bajo el cual fueron reclasificadas, y que denota el nivel de trascendencia que tienen las diversas geometrías en el desarrollo de deslizamientos.

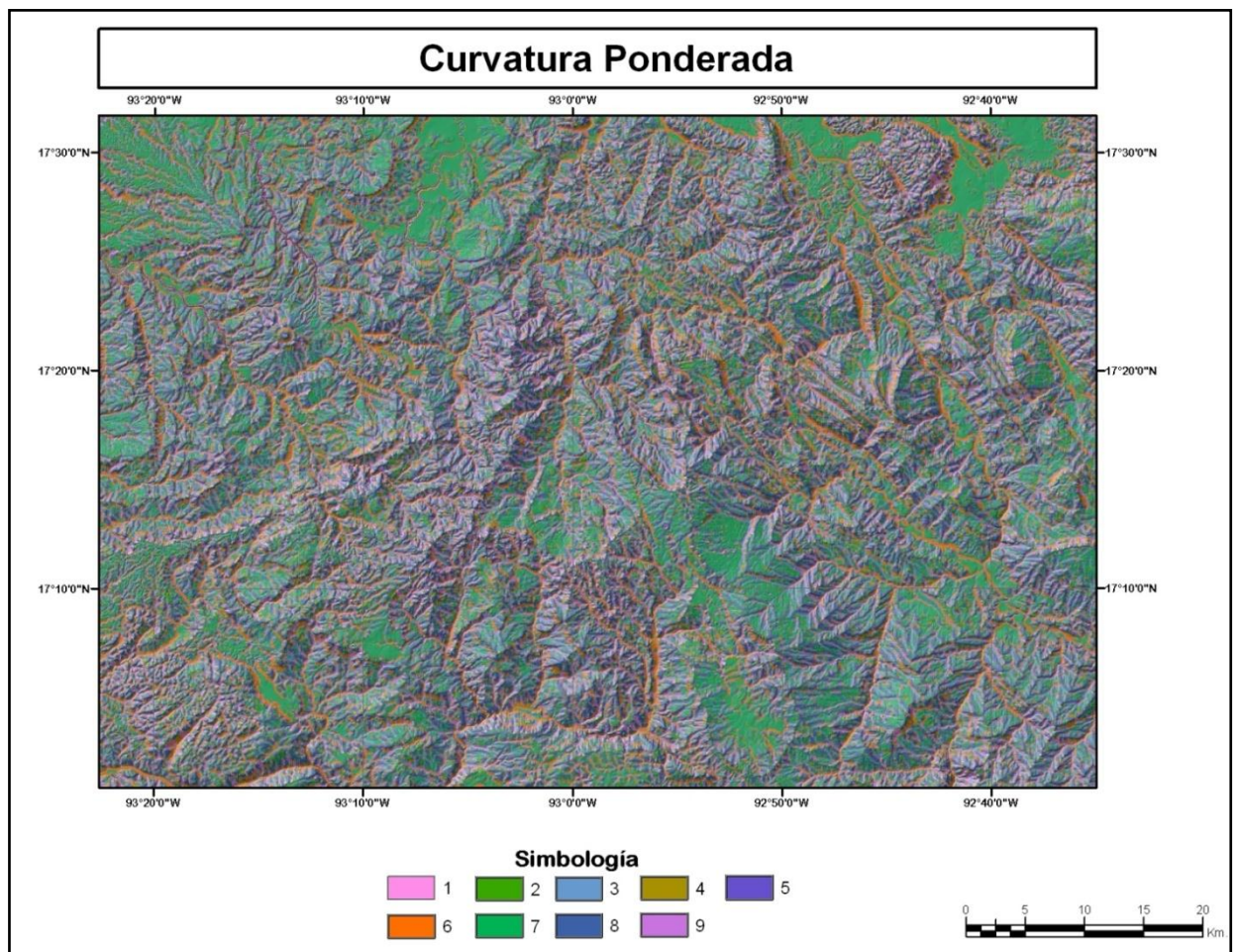


Figura 37. Mapa de Curvaturas Ponderadas.

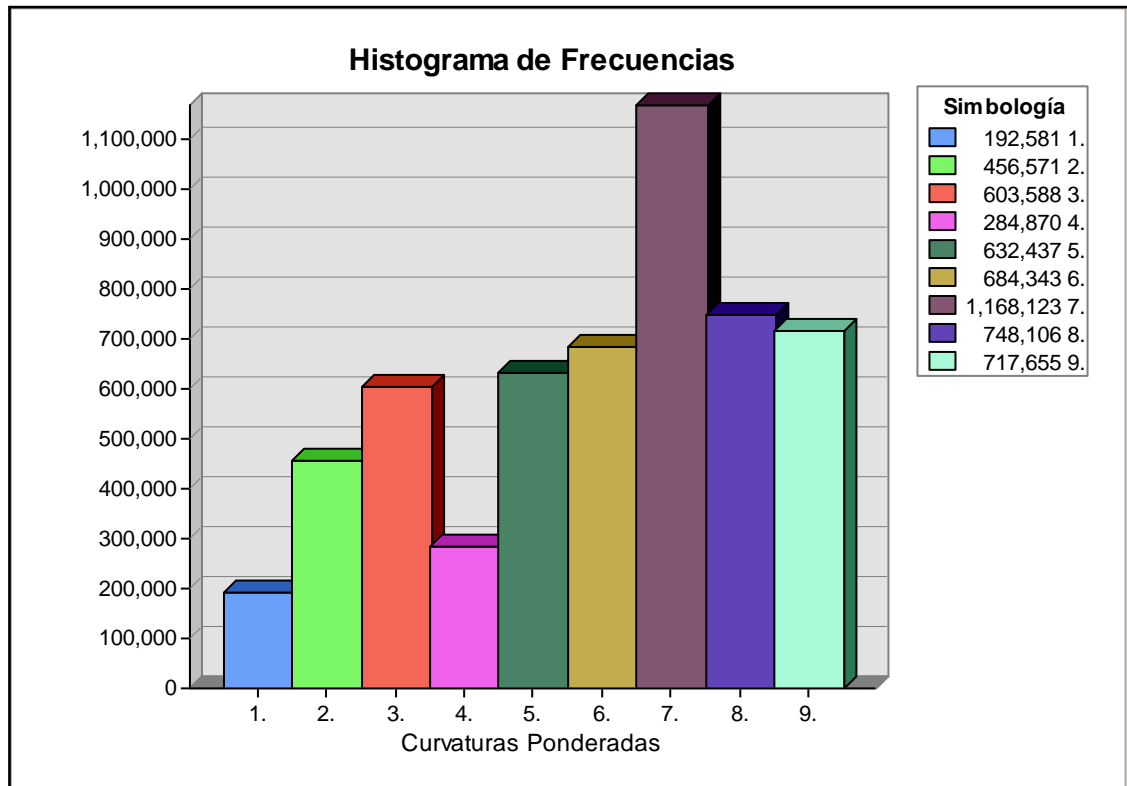


Figura 38. Histograma de Frecuencias de las Curvaturas Ponderadas.

Distribución

Las curvaturas con un valor en el peso de 1, corresponden a una geometría Convexa-Cóncava del relieve, y su distribución en la zona de estudio, si bien se extiende en prácticamente toda el área de trabajo, salvo algunas porciones de las regiones NNW, NNE, y SSE, no abarca superficies de mucha amplitud. Como es claro en la imagen la disposición de estas curvaturas se circunscribe principalmente a áreas de poca extensión.

Respecto a las curvaturas Convexo-Linear, las cuales tienen un peso de valor 2, estas a diferencia de las anteriores con peso de 1, cubren áreas de extensión más notable y se distribuyen de manera homogénea en toda la región bajo estudio. No obstante existen pequeñas porciones de la zona de estudio, en las que la presencia de estas curvaturas es nula, tal es el caso de los sectores NE, NNE, NNW, principalmente.

Para las curvaturas con un peso de valor 3 y una geometría Linear-Cóncava, corresponde una distribución sumamente similar a la de las curvaturas con valor 2, es decir, que con excepción de algunas porciones en las zonas NE, NNE, y NNW, las curvaturas de forma Linear-Convexa tienen presencia en toda el área de trabajo.

En cuanto a las curvaturas con forma Cóncava-Convexa, mismas a las que se les asigno un peso de valor 4, estas presentan un comportamiento semejante a las curvaturas de valor 1, ya que se distribuyen en toda la zona de estudio, excepto en los sectores NE, NNE, NNW, SSE y se encuentran en áreas de corta extensión.

Por otra parte las formas de ladera con peso de valor 5 y una geometría Linear-Convexa, de acuerdo con la, se hallan ampliamente distribuidas en toda la zona de estudio, pero nuevamente y en concordancia con el caso de las curvaturas anteriores, estas exhiben una presencia reducida o nula en las porciones NE, NNE, y NNW de la región de trabajo.

Las curvaturas Cóncavas-Lineares con un peso de valor 6 se encuentran extensamente dispuestas en el área de estudio, y nuevamente a semejanza de los casos de curvaturas con valor de 2, 3, y 5, las zonas donde su presencia es escasa son los sectores NE, NNE, NNW.

En lo que respecta a las geometrías Linear-Linear con peso de valor 7, estas se distribuyen en mayor proporción en los sectores NNW, NW, NNE, NE, SSE, de la zona de estudio, mientras que su presencia disminuye, aunque no de manera drástica, en las porciones Este, SE, SW, SSW, y Oeste, finalmente este tipo de geometrías se presentan en proporciones mínimas en las regiones Norte, Centro, Centro Sur, y en el extremo de la porción SW.

Las geometrías Convexo-Convexo que corresponden a un peso de valor 8, tienen un orden de distribución que abarca prácticamente la totalidad de la zona de estudio, con excepción de las áreas ubicadas en las direcciones NNW, NNE, y NE, así como reducidas superficies en la porción SSE de la región bajo estudio.

Finalmente, las curvaturas con una forma Cóncava-Cóncava y con un peso de valor 9 presentan un comportamiento en su distribución que guarda una fuerte similitud con la distribución de las curvaturas anteriores, por lo que, es posible observar la presencia de este tipo de geometrías en toda la superficie ocupada por el área de estudio, salvo en los sectores NNW, NNE, y NE.

4.1.3 Aspecto Ponderado

El mapa que se puede visualizar a continuación (Figura 39), es el resultado de la reclasificación y ponderación de la capa de aspecto obtenida dentro del SIG, a partir del MDE de la zona de estudio. En la Figura 40 se puede observar la distribución que presentan las distintas orientaciones de las laderas en función del valor del Peso que les fue asignado de acuerdo con su nivel de contribución al desarrollo de deslizamientos.

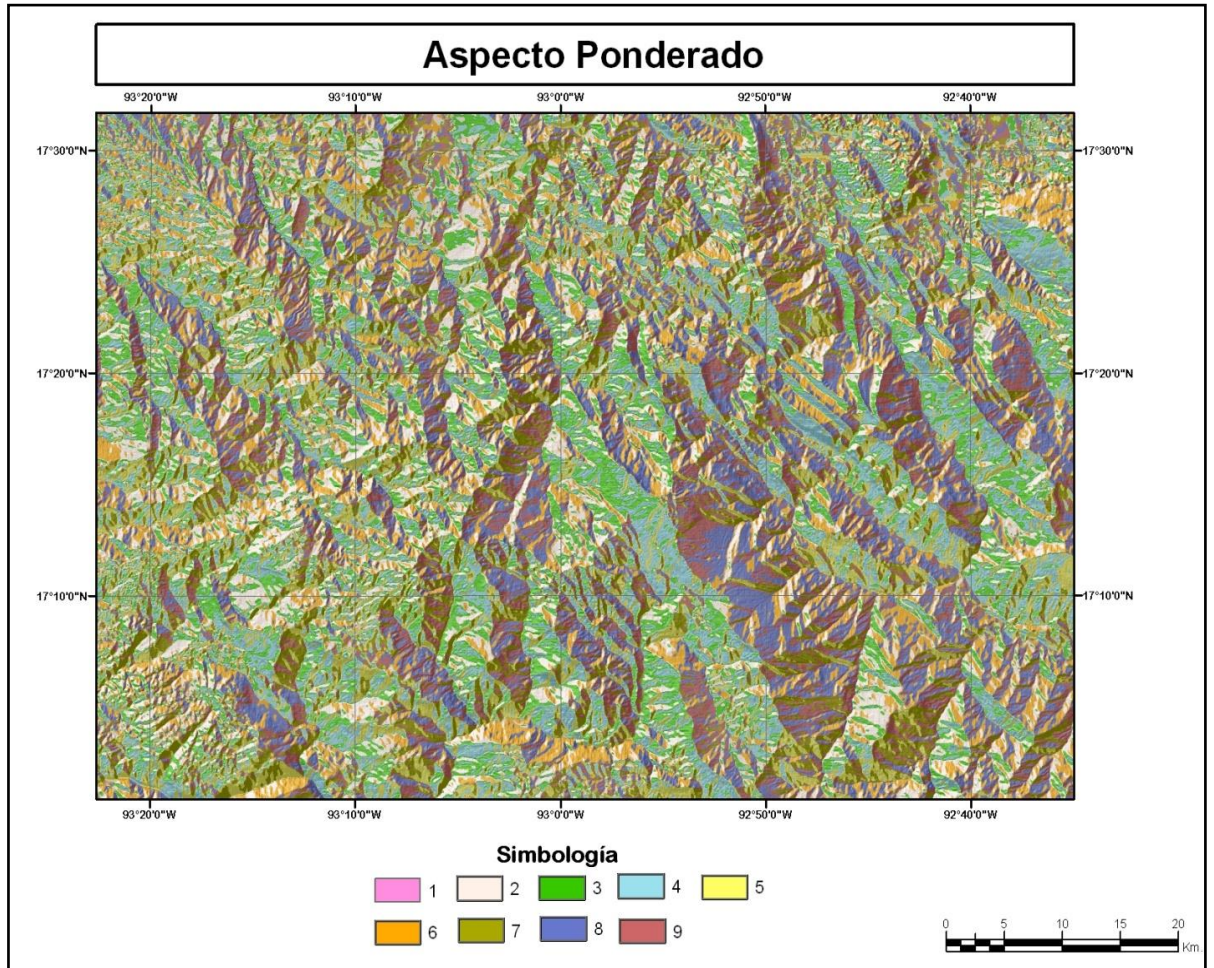


Figura 39. Mapa de Aspecto Ponderado

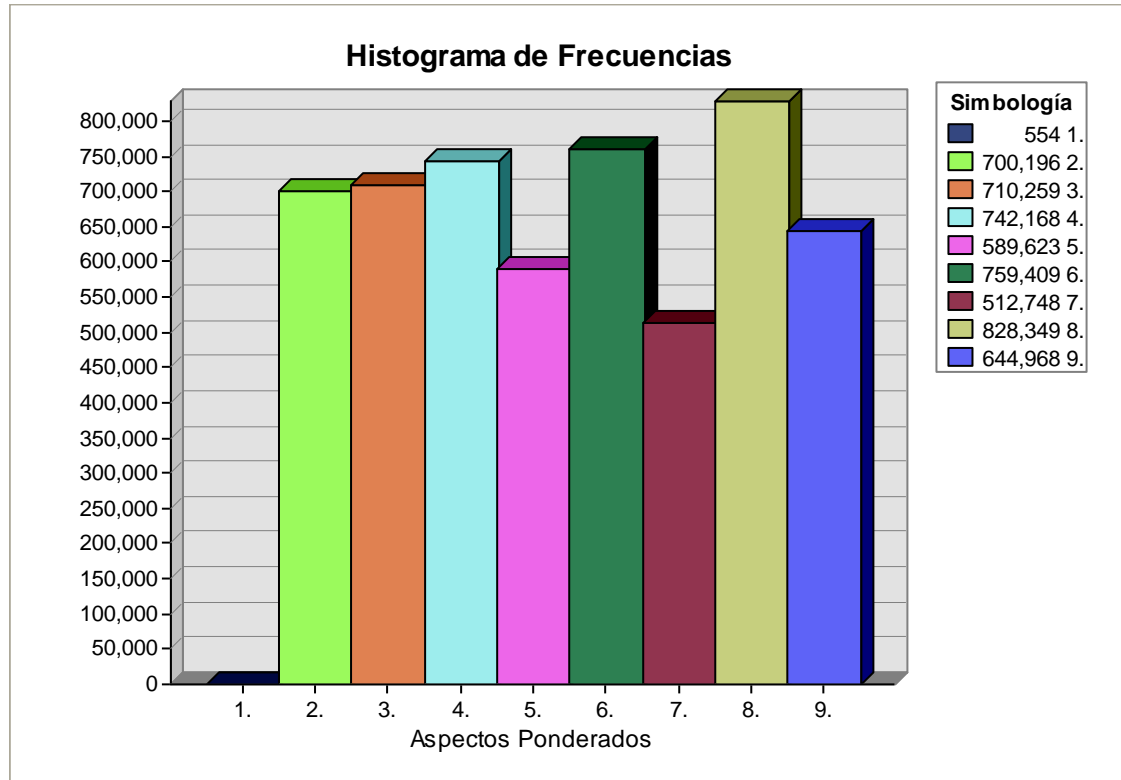


Figura 40. Histograma de Frecuencias de los Aspectos Ponderados.

Distribución

Las orientaciones a las que se les asignó un peso de valor 1 el cual corresponde a superficies planas, es decir, que no se encuentran dispuestas en una dirección preferente sino que son superficies que se extienden en la horizontal/de manera horizontal, tienen una presencia nula dentro del área de estudio.

En lo que respecta a las áreas con orientaciones a la que les corresponde un peso de valor 2 están representadas por la dirección Noroeste, estas se extienden mayoritariamente en las porciones Norte, NNE, NE, NNW, NW, Oeste, SWW, SW, y en el extremo de la región SE; y de manera menos amplia en los sectores Centro sur, Sur, SSE, y Este.

Por otro lado, para las orientaciones con un valor de 3 y una disposición Oeste, se tiene la siguiente distribución: presencia predominante en los sectores Centro norte, Norte, NW, Oeste, SW, Sur, SSE, y Este; extensión moderada en las porciones Extremo SE, NEE, y NE; por ultimo un emplazamiento escaso en las regiones Centro sur y SE.

Para el caso de las laderas con orientación Suroeste y con un peso de valor 4, éstas presentan una distribución de proporciones similares en toda la zona de estudio con excepción de los sectores Centro sur, Sureste, y porciones de extensión regular en las zonas Este, NE, NW, y Oeste.

En lo referente a las vertientes con un peso de valor 5, e inclinación en dirección Sur, se puede observar que si bien éstas se encuentran distribuidas en prácticamente toda el área de estudio en porciones de corta extensión, existe una sección que presenta un alineamiento NW-SE, en la cual la presencia de este tipo de orientaciones es reducida o completamente escasa.

Por su parte, las orientaciones con un valor de 6 y una dirección Norte ostentan una distribución predominante en los sectores Centro, Norte, NNW, NW, NWW, Oeste, SE, Este, NEE, NE, NNE, extremo SW, y extremo Sur, mientras que en las porciones SSW, SSE, y SEE, existe una presencia mínima de laderas con orientación Norte.

En cuanto a las laderas que presentan una orientación Sureste y un peso de valor 7, éstas se reparten de la siguiente manera: proporciones considerables en las superficies que se encuentran en los alineamientos en dirección Norte-Sur, SW-NE, así como en las porciones Oeste y SE, en tanto que en las zonas NW, Centro sur, y SSE, la existencia de áreas con orientación de peso 7, es escasa.

La distribución en la zona de estudio de la vertientes con peso de valor 8 y una orientación Noreste se acentúa preferentemente en los sectores NW, Centro, Sur, SE, y Este, continuando con una presencia moderada en las porciones Norte y NE, hasta llegar a ser reducida en las direcciones Oeste, extremo SW, extremo Sur, y SSE.

Finalmente, es en las porciones NW, Oeste, extremo SW, extremo SSW, extremo NEE, y el tramo que comprende del Centro al extremo SSE, en las que la disposición de superficies con orientación Este, y un peso de valor 9, es mínima o nula, mientras que en el resto de la zona de estudio la presencia de este tipo de orientaciones puede considerarse notable.

4.1.4 Geología Ponderada

A continuación se muestra el mapa de geología ponderada (Figura 41) y el histograma de frecuencias (Figura 42) en los cuales se puede visualizar la distribución de los distintos tipos de litologías presentes en la zona de estudio, de acuerdo con el peso que cada una de ellas tiene en el desarrollo de los procesos de remoción en masa. En seguida se desglosa la disposición que tiene cada geología ponderada dentro de la región de estudio.

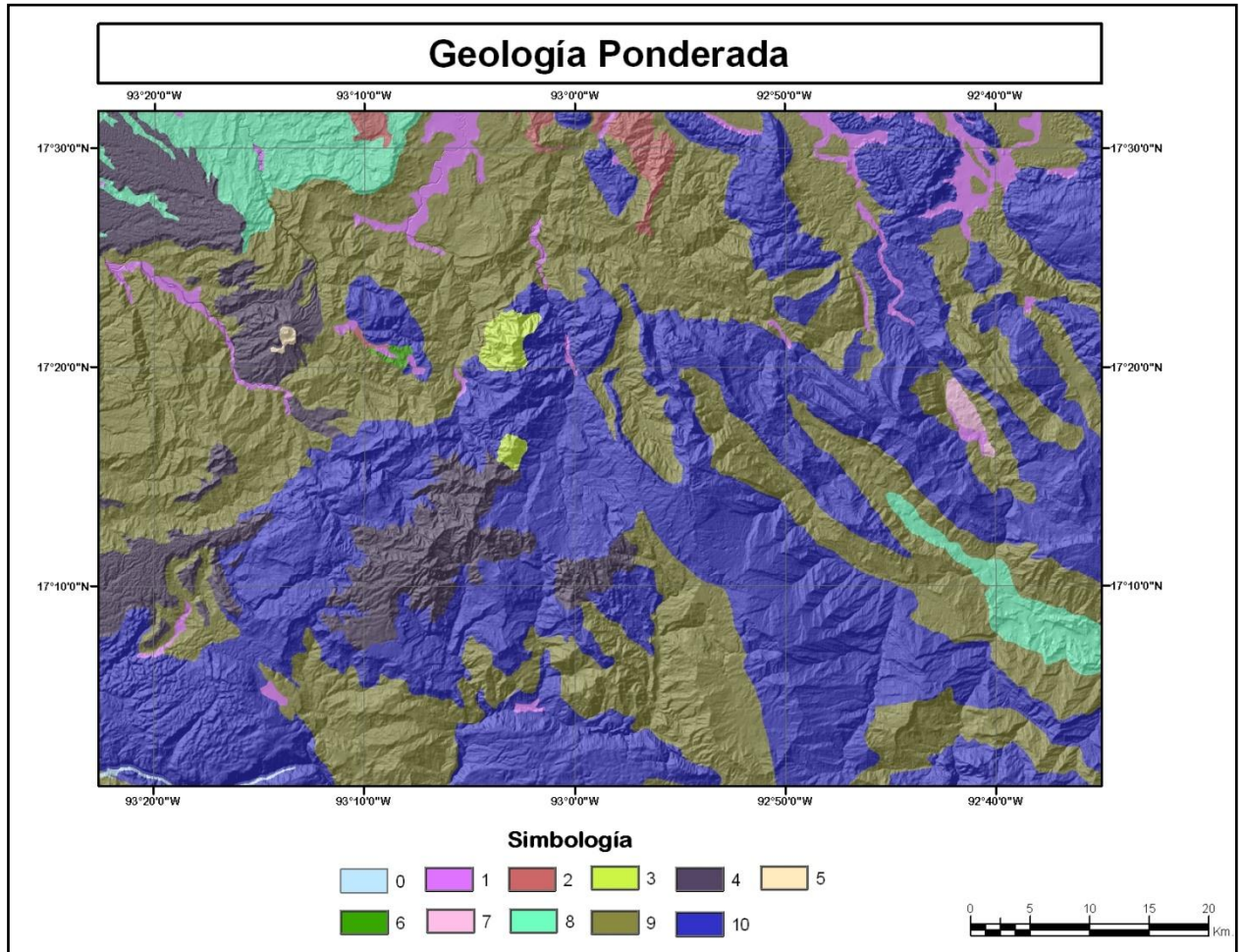


Figura 41. Mapa de Geología Ponderada

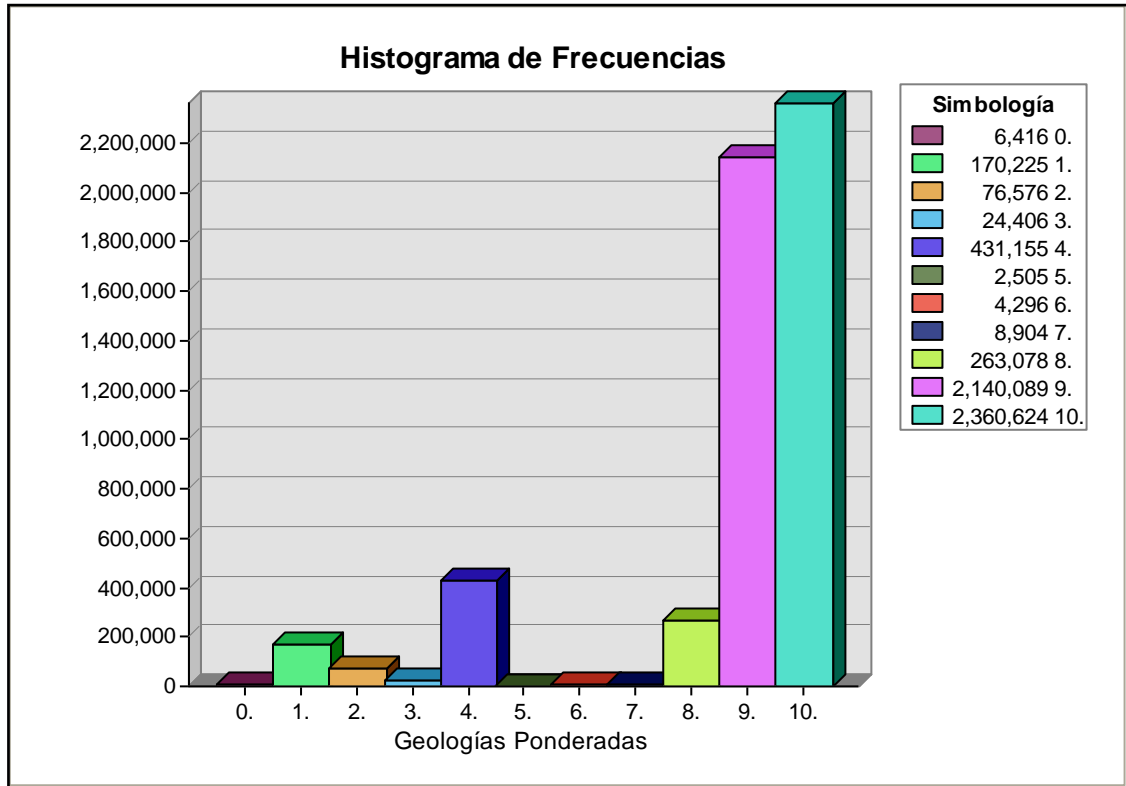


Figura 42. Histograma de Frecuencias de las Geologías Ponderadas.

Distribución

Las litologías con peso de valor 1 correspondientes a superficies aluviales, presentan una distribución que abarca superficies de extensión considerable en el extremo de las porciones NWW, NNW, Norte, y NE; mientras que existen regiones con presencia mínima de estas litologías en los sectores Este, Sur, y SE, de la zona de estudio. En lo que respecta a las litologías Andesita y Toba intermedia a las que les corresponde un peso de valor 2, estas se presentan únicamente en el sector Norte de la zona de estudio. Para el caso de la litología del tipo Granodiorita con un peso de valor 3, su distribución se localiza solamente en la zona Centro Norte de la región de estudio, y presenta una extensión pequeña.

En cuanto al tipo de litología que corresponde a Andesita-Brecha volcánica intermedia con un peso de valor 4, ésta se localiza únicamente en las porciones NW, SWW, y Centro Sur de la zona de estudio. Por otra parte la litología de tipo Brecha volcánica intermedia con un peso de valor 5, se halla emplazada exclusivamente en la parte superior del volcán Chichón. Respecto a la litología de carácter conglomerado con un peso de valor 6, esta se encuentra ubicada en una porción de muy corta extensión en el sector Centro Occidente del área de estudio.

En lo que concierne a la litología de Brecha sedimentaria a la cual le corresponde un peso de valor 7, se observa una disposición única de este tipo de litología en la zona Este de la región de estudio. La litología con un peso de valor 8 de tipo Arenisca se extiende de manera exclusiva en superficies de extensión considerable en las direcciones NW y SE.

En relación a la litología Lutita-Arenisca la cual posee un peso de valor 9 se puede apreciar que tiene una distribución que abarca áreas de amplia extensión en las porciones NNE, NE, Este, SE, SSE, SSW, Oeste, NW, y NNW, del área de trabajo. Finalmente la litología correspondiente a un peso de valor 10 y un tipo Caliza, presenta una disposición que abarca predominantemente los sectores NNE, NE, Este, SE, Sur, SW; y de manera mínima las porciones Centro Occidente y Norte de la zona de estudio.

4.1.5 NDVI Ponderado

En el mapa que se presenta en seguida (Figura 43) y en el histograma de frecuencias (Figura 44) se observan los diferentes niveles del Índice de Vegetación Normalizado representados por el valor del peso que se determino para tales niveles, de acuerdo con el grado de trascendencia que tiene cada uno en el desarrollo de procesos de remoción en masa.

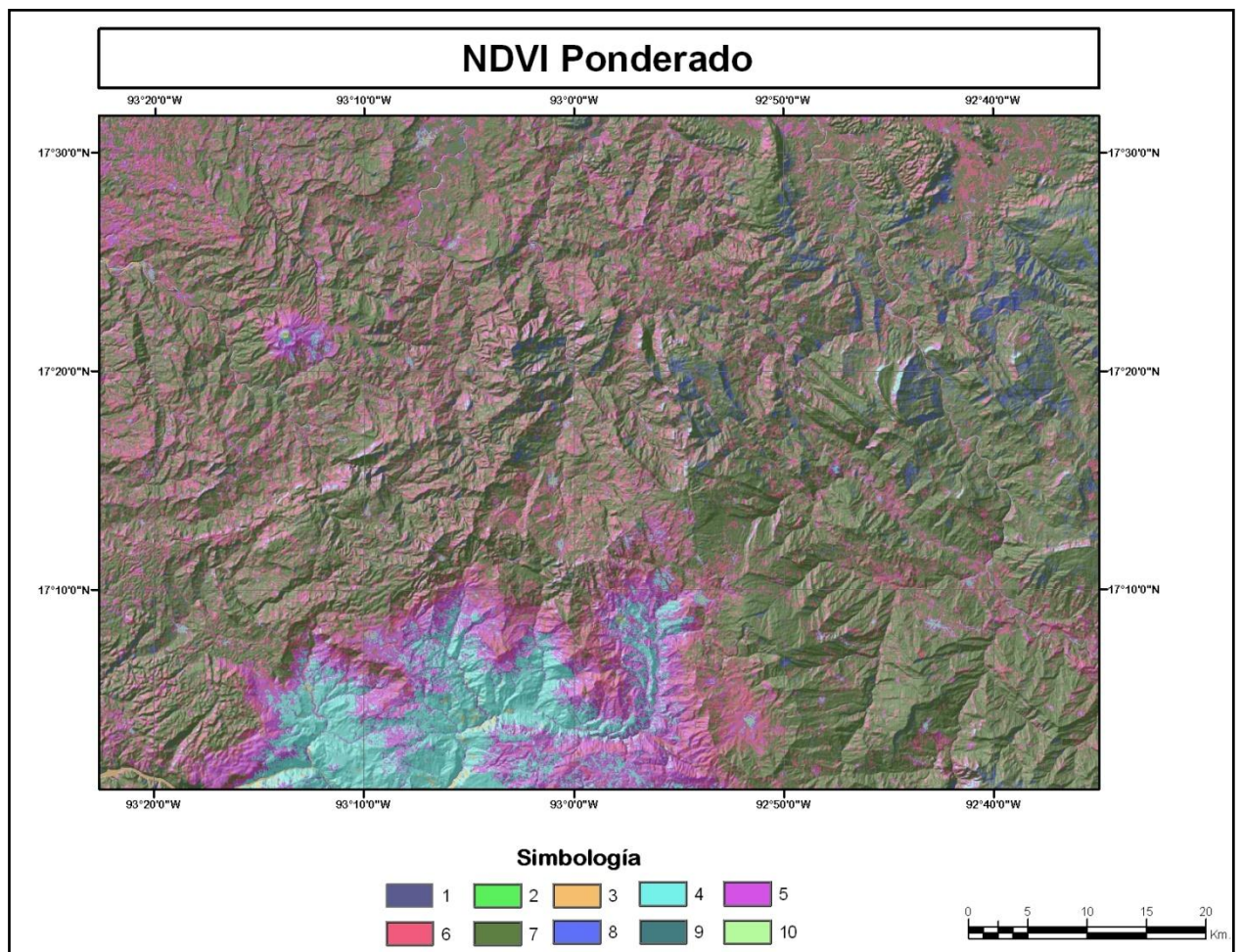


Figura 43. Mapa del NDVI Ponderado

Las proporciones en las que los diversos niveles de densidad de vegetación se distribuyen en la zona de estudio se pueden observar claramente en la Figura 44.

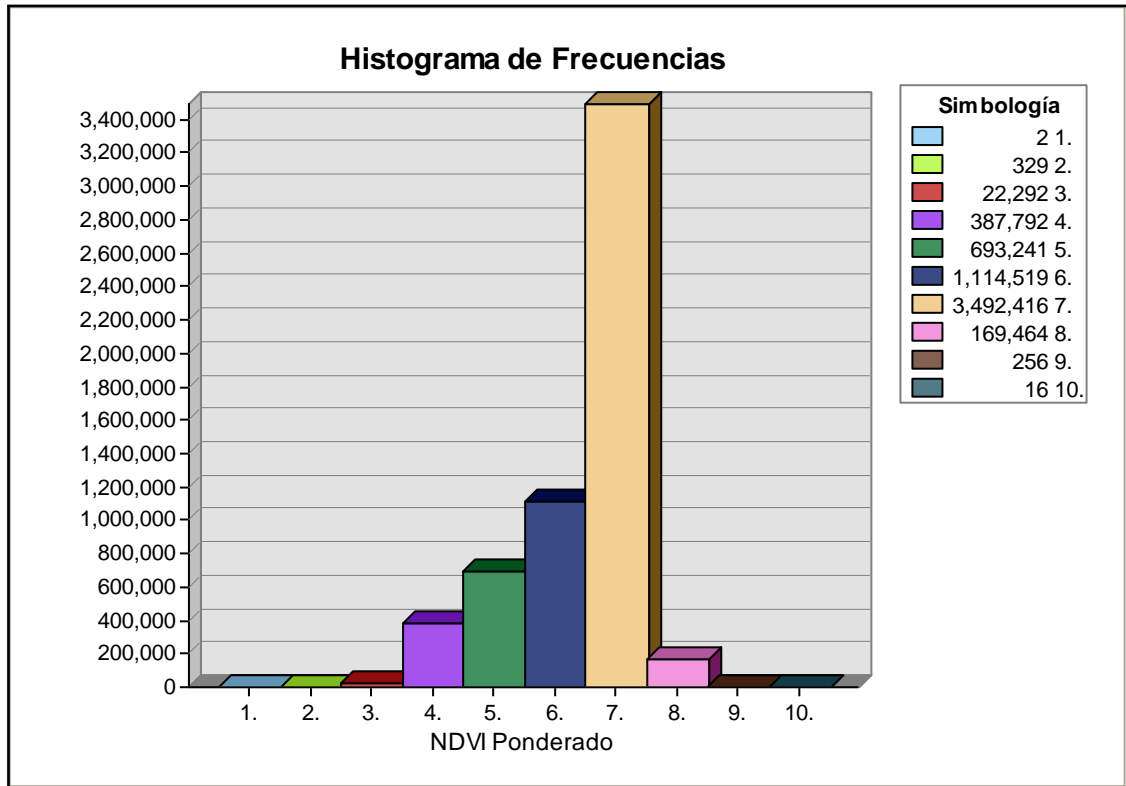


Figura 44. Histograma de Frecuencias del NDVI Ponderado.

Distribución

La distribución para el índice de vegetación con un peso de valor 1, y con un rango que va de 1 a 0.80, así como para el índice con un peso de valor 2, y un rango de 0.80 a 0.60, es nula, es decir, no existe superficie alguna dentro del área de estudio que este al cien por ciento cubierta por vegetación, o por lo menos que posea una cobertura de alta densidad de follaje.

Para el caso del índice de vegetación con un rango de 0.60 a 0.50, y un valor de 3 en su peso, se advierte una distribución mínima en los sectores NWW, SW, y en puntos dispersos en las regiones SSE, Centro, y NNW.

Por otro lado las áreas ocupadas por superficies con un índice de vegetación ligado a un peso de valor 4, y un rango de 0.50 a 0.30, se concentran sustancialmente en la porción Sur y SSW de la zona de estudio cubriendo territorios extensos, en contraste con el resto de la región de estudio en el que solo se pueden visualizar fracciones pequeñas y dispersas ocupadas por terrenos con dicho peso de valor 4.

En cuanto al índice de vegetación al que le corresponde un peso de 5 y un rango de 0.30 a 0.20, este presenta una distribución que se acentúa de manera considerable en las zonas Sur y SW, así como en las laderas inmediatas al cráter del volcán Chichón. Por otro lado, existe una presencia dispersa pero constante de superficies con dicho peso principalmente en los sectores Norte, NNE, NNW, NW, Oeste, y SWW. Finalmente en el resto del área de estudio, es decir, en las zonas Este, SE, y SSE se pueden observar pequeñas porciones ocupadas por una densidad de cubierta vegetal que corresponde al rango de 0.30 a 0.20 del NDVI.

En lo que respecta a la distribución de superficies con un valor de 6 y un rango en el NDVI que va de 0.20 a 0.0, éstas se extienden predominantemente en los sectores Centro, Centro Sur, Norte, NNE, NE, SSE, SW, Oeste, y NW, por el contrario las porciones Este, Sureste, y Sur presentan este tipo de superficies en una proporción menor, y por último el sector SSW, prácticamente carece de áreas con un peso del valor del que se está hablando.

La distribución de espacios ocupados por cubiertas vegetales con un rango en el NDVI de 0.0 a -0.20 y un peso de valor 7, se emplaza de manera considerablemente densa y se extiende básicamente en toda el área de estudio, con excepción de las zonas Sur, SSW, y las laderas circundantes al cráter del volcán Chichón, así como en pequeñas partes de los sectores NW, y NNE. Por otra parte, en el caso de las áreas a las que corresponde un rango en el índice de vegetación que va de -0.20 a -0.40, y un peso de valor 8, estas presentan una disposición que se concentra primordialmente en las zonas Centro, NE, Este, y SEE; mientras que en el resto de la región de estudio solo existen puntos dispersos de extensión mínima. Finalmente, para los casos de pesos de valor 9 y 10, y de rango en el NDVI de -0.4 a -0.60 y de -0.60 a -0.80 respectivamente, corresponde una distribución que es completamente nula, es decir, la zona de estudio carece en su totalidad de espacios que contengan una densidad de vegetación representativa de los valores antes mencionados en cuanto al índice de vegetación.

4.2 Discusión

Como puede observarse en la descripción de la distribución de las diferentes clases de los factores que determinan el modelo de susceptibilidad al deslizamiento, la zona de estudio, la cual queda enmarcada en la porción norte del estado de Chiapas, es un territorio muy diverso y heterogéneo, en cuanto a sus características topográficas, geomorfológicas, geológicas y de vegetación. Dicha diversidad depende en gran medida de procesos como la evolución y constitución geológica del territorio, la diferenciación de los movimientos neotectónicos de la corteza terrestre y la consolidación de contrastes entre escalones morfoestructurales del relieve (Bollo y Santana, 2008). Así pues, es esa misma heterogeneidad la que promueve interacciones

entre los distintos factores que pueden llevar a una región a ser altamente o moderadamente susceptible de desarrollar deslizamientos.

En lo que respecta a las pendientes, su comportamiento en la zona de estudio responde básicamente, de acuerdo con la literatura y contrastándolo con los resultados arrojados por el modelo, por un lado, a la compleja fisonomía del relieve de la zona de estudio, la cual está condicionada, como ya se ha mencionado, por varios factores: la tectónica, activa desde el Neógeno e intensa en la actualidad; por la litología, la estructura geológica y las condiciones climáticas (Lugo, 1990). Y por el otro, a las peculiaridades geológico-estructurales de la región que producen un gradiente altitudinal desde la costa del Golfo de México hasta la Sierra de Chiapas (Bollo, 2008). En general, el relieve del territorio se caracteriza por una serie de escalones orográficos, que transitan desde montañas bajas y premontañas hasta lomeríos y un sistema de planicies planas, onduladas, colinosas y muy colinosas (Hernández, et al 2009).

Por otra parte en lo que se refiere a la distribución de los diferentes tipos de litología en la zona de estudio, su presencia y disposición, ésta se puede explicar como un resultado de la compleja historia geológica del sureste mexicano, y en particular de la región bajo estudio, a grandes rasgos caracterizada por sedimentación de lechos rojos, invasión de aguas marinas, depósito de grandes volúmenes de sal, sedimentación dominada por carbonatos, posteriormente clásticos, depósito de carbonatos de plataforma somera, y actividad volcánica cuaternaria y reciente de El Chichón, así como por una dinámica actividad tectónica.

Respecto a la distribución que presentan los distintos valores del índice de vegetación normalizado en el área de estudio, éstos exhiben un mosaico muy variado que de acuerdo con el grado de cobertura vegetal que representan, reflejan una notable diversidad en el uso de suelo (vegetación natural de selva alta perennifolia y selva mediana perennifolia, cultivos de subsistencia, de plantación, de temporal, ganadería extensiva, potreros), el cual está fuertemente influenciado por las actividades económicas imperantes en la zona, las cuales son principalmente la agricultura con plantaciones y cultivos, así como la ganadería donde predominan los pastizales (Perfiles municipales, 2012; Bollo, M., y Santana, R., 2008).

Como dichas actividades requieren por su naturaleza de grandes extensiones de terreno para su desarrollo, el proceso de desmonte, es decir, de remoción de la cubierta vegetal original, explican la presencia de parches de múltiples tonalidades en el NDVI, y por ende el comportamiento de la distribución tan heterogénea de vegetación en el mapa ponderado. Cabe señalar que de acuerdo con observaciones hechas en los mapas ponderados la vegetación original ha sido sustituida en áreas con incluso fuertes pendientes.

En la zona bajo estudio, se presenta una distribución de curvaturas muy variada y compleja, compuesta por una amplia gama de geoformas tales como bordes convexos por contacto entre substratos, niveles cumbrales cupuliformes y parteaguas lineales, sierras amogotadas o de cumbre en forma de cúpula; parteaguas con forma circular; cumbres basculadas, superficies con estructuras anulares, llanuras y terrazas, planicies colinosas u onduladas, etc. Esta distribución de los diversos tipos de geometrías en la topografía del área de trabajo, es muy diversa, y se puede considerar como una consecuencia de la interacción entre factores modeladores del relieve, es decir, que la geomorfología de la zona de estudio es una expresión

de la influencia estructuro-geológica, tectónica y litoestratigráfica. Por otra parte, también es notable el desarrollo de formas erosivas como surcos, senderos ganaderos y cárcavas, entre otros, dado el uso ganadero.

Finalmente la distribución de los distintos tipos de orientaciones presentes en el área de estudio responde principalmente a la complejidad del relieve de la zona de estudio, el cual pertenece a la provincia geológica del Cinturón Chiapaneco de Pliegues y Fallas (Ortega, F., et al, 1992), que se encuentra conformado por la provincia tectónica de Simojovel. Así mismo, la diversidad de orientaciones o aspectos del territorio de estudio se explica por su posición geotectónica de interacción entre la Sierra Norte de Chiapas, bajo la intensa influencia del mecanismo regional de transcurrancia de izquierda (Caribe septentrional-Motagua-Chiapas) y el margen pasivo del Golfo de México.

Conforme a lo expuesto líneas arriba, la dirección predominante de las estructuras de plegamientos es NW-SE, aunque existen también dos sistemas de fallas: el más antiguo presenta rumbo general WNW-ESE, y el formado por fallas y fracturas del sistema NNE-SSW, que cortan a las fallas y fracturas del primer sistema (García-Palomo, A., et al, 2004).

Por otra parte, la estructura del relieve posee un escalonamiento neotectónico cuyos límites están controlados, a grandes rasgos por los sistemas de fallas y fracturas de dirección SE-NW y SW-NE. Cabe destacar que existen bloques morfoestructurales con dirección NW-SE, controlados por fallas de dirección SW-NE. Finalmente otro elemento estructural es la edificación volcánica de El Chichón, con una orientación NNW-SSE cortado por fallas transcurrentes de dirección W-E (Hernández, J., et al, 2012).

4.3 Mapa de susceptibilidad

Finalmente el índice de susceptibilidad, calculado mediante la suma lineal ponderada de pesos de factores y clases, da como resultado un mapa que muestra en forma de gradiente la susceptibilidad al deslizamiento en la zona de estudio, dicho gradiente refleja de manera numérica el grado de propensión de la zona a desarrollar deslizamientos (Figura 45).

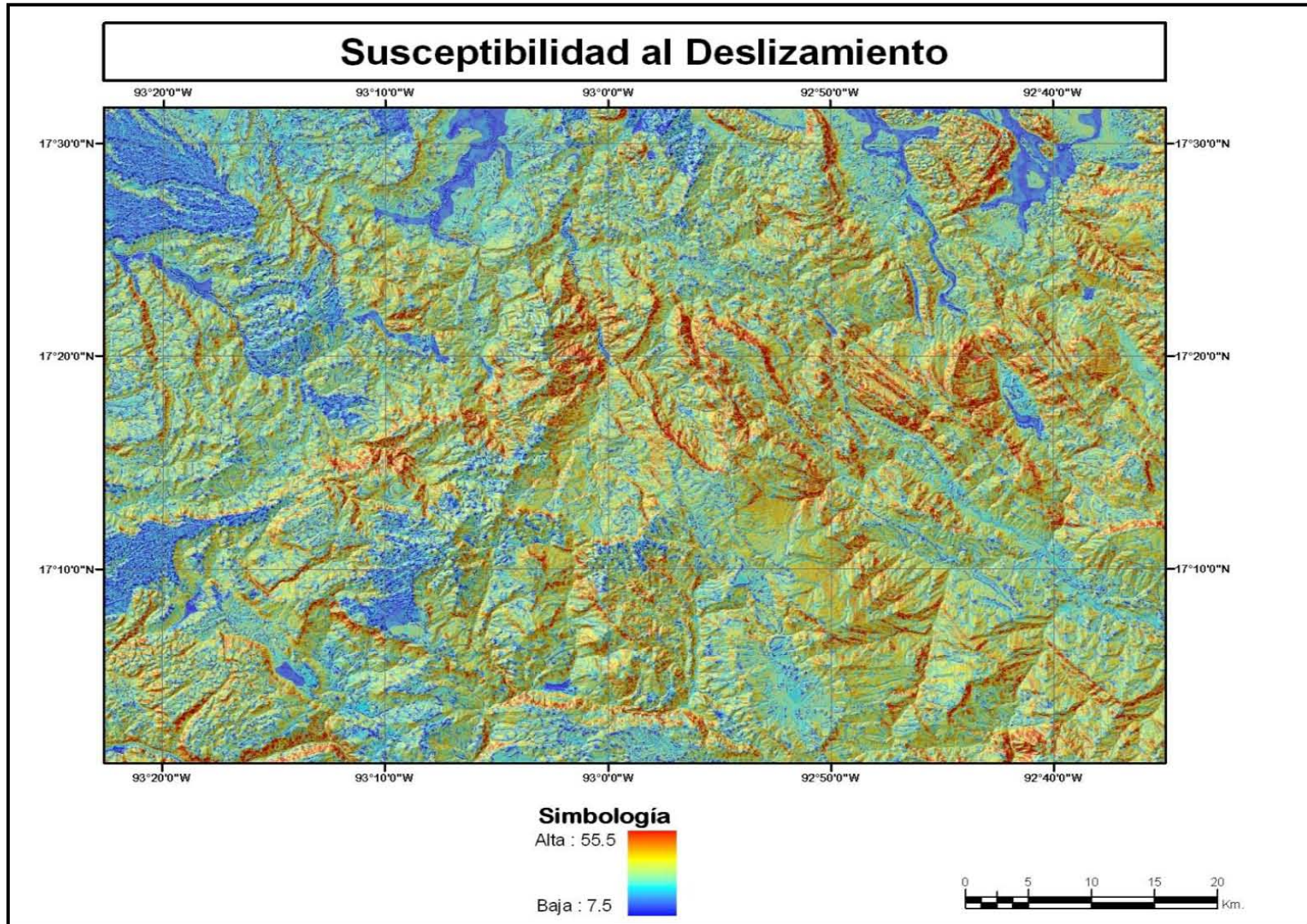


Figura 45. Susceptibilidad al Deslizamiento.

A continuación se reclasifica el mapa de susceptibilidad al deslizamiento, tomando en consideración cuatro sistemas de clasificación que utilizan los así llamados rupturas naturales, cuantiles, intervalos iguales, y desviación estándar, e intentando escoger el que mejor se adecue a los objetivos de este trabajo. Mientras que estos sistemas de clasificación están bien establecidos en la estadística, ellos frecuentemente llevan a diferentes resultados, ya que hacen declaraciones muy diferentes sobre cómo los valores deben dividirse. El esquema de clasificación que se basa en rupturas naturales, identifica por ejemplo puntos de ruptura buscando patrones inherentes en los datos. En la clasificación de cuantiles, los rasgos son agrupados por igual número en cada clase. El esquema de intervalos iguales divide el rango de valores en subdivisiones de igual tamaño. Finalmente cuando la desviación estándar es usada, los datos son clasificados basados en la cantidad que un valor varía de la media.

La clasificación por cuantiles tiene una desventaja, que pone valores muy diferentes en la misma clase. Por lo tanto, dicha clasificación no fue usada en este trabajo. El esquema de rupturas naturales, los límites son establecidos donde hay relativamente grandes saltos en los valores de los datos. Los valores numéricos obtenidos en este estudio son multimodales, y tienen un número de picos pero no muestra intervalos de clase vacíos o saltos. De esta manera, las rupturas naturales no demostraron ser apropiadas para este estudio. De acuerdo con lo anterior, el sistema de clasificación que se considero pertinente fue el de intervalos iguales, ya que éste permite dividir los valores en partes de igual tamaño. Así pues, la clasificación final de la susceptibilidad que dio como resultado un mapa que zonifica la región de estudio en niveles de susceptibilidad, muestra 5 categorías de riesgo, las cuales son Muy altas, Alta, Media, Baja y Muy baja Figura 46.

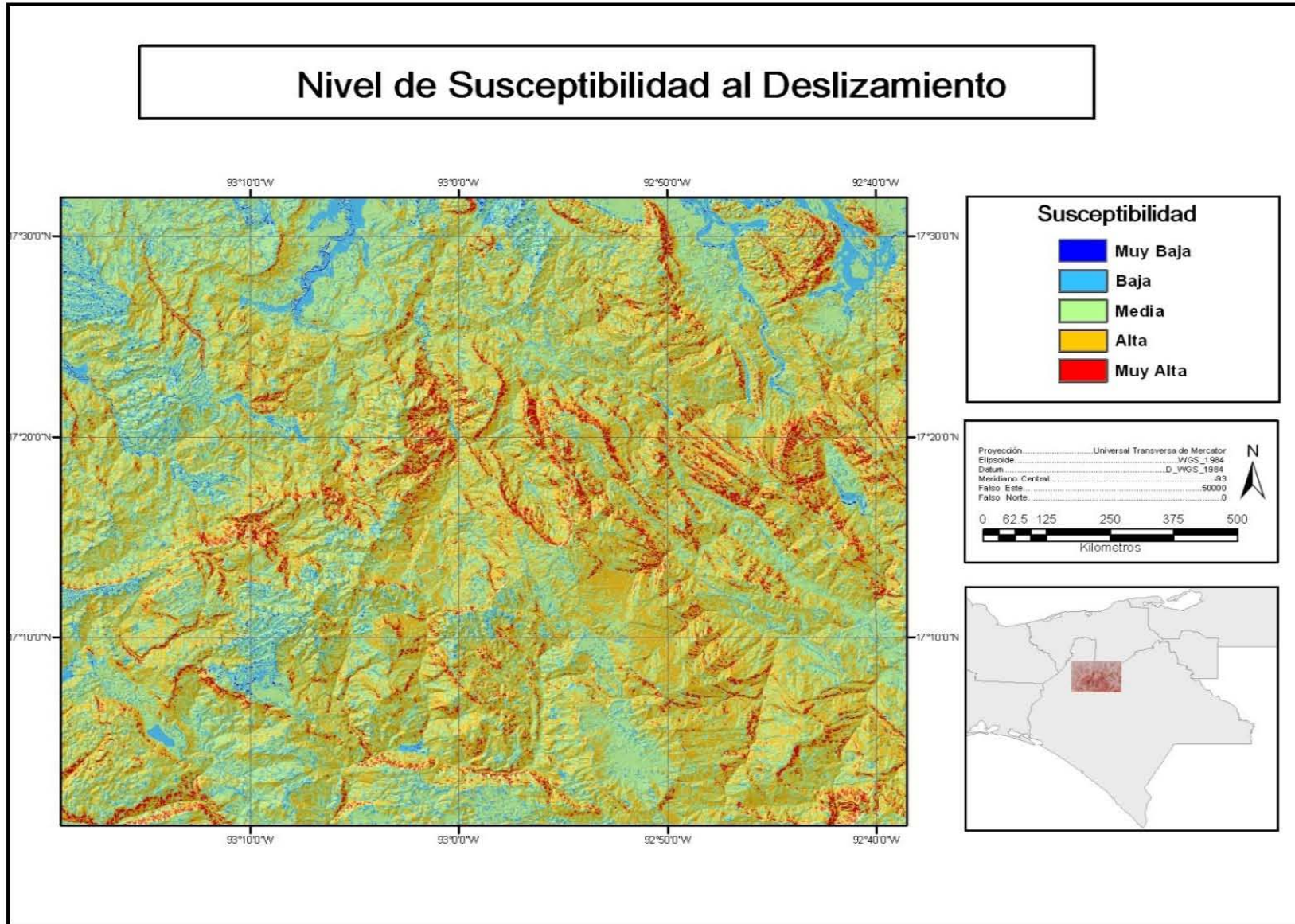


Figura 46. Mapa Final de Susceptibilidad al deslizamiento, indicando los niveles de susceptibilidad.

Como es posible observar en el mapa final de susceptibilidad, los niveles en los que fue reclasificado, muestran porciones de la zona de estudio con extensión considerable, con una Muy alta y Alta (30%) propensión a desarrollar deslizamientos. Sin embargo la mayor extensión del territorio muestra niveles Medios y Bajos (60%), y Muy Bajos (10%). Lo anterior, denota que si bien no es una gran porción la que se encuentra bajo un Alto riesgo, si es necesario poner atención sobre aquellas regiones que están marcadas como de Alta Susceptibilidad.

CONCLUSIONES

Este estudio ha permitido evaluar la susceptibilidad a deslizamientos en una porción de la Sierra Norte de Chiapas. Esta área jamás había sido investigada antes, al menos no desde la perspectiva considerada en este trabajo. La alta frecuencia e intensidad de los procesos erosivos, ha subrayado la importancia estratégica de una evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento en el área estudiada, cuya economía, ampliamente basada en la agricultura y en la ganadería, ha sufrido este fenómeno.

La ocurrencia y comportamiento de los deslizamientos son gobernados por numerosos factores espaciales que pueden ser, para el propósito de la evaluación de susceptibilidad regional, divididos en varios importantes. Datos sobre estos factores pueden ser relativamente fácilmente adquiridos desde mapas geológicos, mapas topográficos, MDE's, fotografías aéreas e imágenes de satélite. Las capas de datos que son utilizados en la producción de mapas de susceptibilidad al deslizamiento deben ser seleccionados cuidadosamente analizando los parámetros que afectan la formación de deslizamientos en la región.

El objetivo de este trabajo ha sido el desarrollo de una cartografía para la predicción de deslizamientos. Los mapas de susceptibilidad al deslizamiento son herramientas preventivas que intentan minimizar el riesgo en áreas amenazadas. Debido a las implicaciones sociales y económicas en la prevención del riesgo una cuestión clave es la calidad de los mapas, los cuales deben derivar de un procedimiento apropiado.

La metodología propuesta es aplicada en un ambiente SIG, permitiendo una rápida delineación, así como la cuantificación objetiva de los factores determinantes. Así mismo, la herramienta presentada aquí ofrece un proceso automático de mapeo de la susceptibilidad al deslizamiento.

La metodología planteada para evaluar la susceptibilidad al deslizamiento está basada en un procedimiento robusto y reproducible, con datos temáticos simples y fáciles de obtener. Este estudio ha demostrado que el uso de un área de muestreo que represente correctamente la geomorfología de un área, combinada con el uso de variables predictivas, es suficiente para construir, un modelo para la evaluación de la susceptibilidad al deslizamiento. Usando técnicas SIG un mapa de susceptibilidad fue construido. Una vez que el mapa de susceptibilidad es dibujado, es posible hacer una selección de los terrenos más apropiados para los establecimientos humanos, o de las áreas donde estudios más detallados serían necesarios.

La susceptibilidad al deslizamiento y los factores determinantes involucrados en la inestabilidad difieren para cada tipo de deslizamiento. En el ejemplo presentado en este trabajo, todos los tipos de deslizamientos fueron considerados como un todo, y el mapa resultante de susceptibilidad al deslizamiento no fue derivado desde algún tipo particular de deslizamiento. Sin embargo, este puede adecuarse únicamente para una zonificación inicial, mientras que un mapa de susceptibilidad detallado deberá ser preparado procesando separadamente los deslizamientos por tipologías y usando como entradas únicamente aquellos datos necesarios para cada grupo o tipo. De hecho, el propósito de los mapas de poco detalle, como el que aquí se elaboró, es dar una indicación más aproximada de las zonas inestables que una localización precisa de las áreas potencialmente afectadas.

Los resultados obtenidos demuestran que es posible producir mapas razonablemente satisfactorios con el método descrito, usando las funciones indicadas. Los mejores modelos no son necesariamente aquellos que utilizan el número más grande de variables. Esto significa que una cuidadosa selección de variables reducirá considerablemente los esfuerzos sin afectar la calidad de los resultados. El método propuesto se considera eficaz para la evaluación de la susceptibilidad a los deslizamientos a escalas intermedias, en zonas donde no se dispone de datos geotécnicos o hidrogeológicos. Así mismo, la capacidad predictiva del modelo, sugiere que la pendiente, el aspecto, la curvatura, la litología, y el índice de vegetación son factores suficientes para crear un mapa óptimo de susceptibilidad a deslizamientos en el área de estudio. Esta investigación además establece que el gradiente topográfico regional es una característica importante en el proceso de delineación de áreas potencialmente peligrosas.

Por otra parte, cambios en el uso de suelo, llevan a una severa y acelerada degradación de la tierra, incluyendo erosión y deslizamientos. Esto causa inestabilidad en el paisaje y la aceleración o emergencia de procesos de degradación. Los procesos presentes en la zona de estudio causan actualmente, degradación de la tierra y, a su vez, los niveles de susceptibilidad ponen en riesgo la actividad agrícola en algunos sectores.

Finalmente, se observa que una considerable porción del área de estudio muestra una alta o muy alta susceptibilidad al deslizamiento. Esto denota fuertemente la inevitable necesidad de una planeación del uso de suelo exacta en el área de estudio, dirigida a minimizar la detonación de fenómenos erosionales inducidos gravitacionalmente lo cual podría tener desastrosas consecuencias para la débil economía local ampliamente basada en la agricultura y la ganadería.

Referencias

- Alcántara I., y Murillo F., 2008. Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.*
- Alcántara I., Esteban O., y Parrot J., 2006. Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico. *CATENA.*
- Alcántara I., y Borja R., 2004. Procesos de remoción en masa y riesgos asociados en Zacapoaxtla, Puebla. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM.*
- Arcila G., 2003. *Sistemas de información geográfica y medio ambiente. Principios Básicos.* España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz.
- Ayalew L., Yamagishi H., y Ugawa N., 2004. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture, Japan. *Landslides* 1 (1): 73-81.
- Ayenew T., y Barbieri G., 2005. Inventory of landslides and susceptibility mapping in the Dessie area, northern Ethiopia. *Engineering Geology.*
- Beguiría S., 2006. Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology* 74.
- Blahut J., Van Westen, C., y Sterlacchini, S., 2010. Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas. *Geomorphology* 119.
- Bollo M., Hernández J., y Méndez A., 2010. Evaluación de potencialidades naturales en el ordenamiento ecológico territorial: noroeste del Estado de Chiapas, México., *Boletín de la Asociación Geógrafos Españoles*, núm. 53. ISSN 0212-9426
- Bollo, M., y Hernández, J., 2008. Paisajes físico-geográficos del noroeste del estado de Chiapas, México., *Investigaciones Geográficas, Boletín*, núm. 66, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Bonham-Carter, G., 1994. *Geographic Information System for Geoscientist: Modelling with GIS.* Países Bajos: Pergamon.
- Bosque J., 1995. Modelo Digital del Terreno. *MAPPING INTERACTIVO. Revista Internacional de Ciencias de la Tierra.*

- Bosque J., Dominguez J., y Vega J., 1990. Generación de un modelo topográfico digital para la ciudad de Granada: Problemas y soluciones con el programa IDRISI. Paper presented at IV Coloquio de Geografía Cuantitativa.
- Carrara A., Guzzetti F., Cardinali M., y Reichenbach P., 1999. Use of GIS Technology in the Prediction and Monitoring of Landslide Hazard. *Natural Hazards* 20 (2): 117-135.
- Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., y Reichenbach P. 1995. GIS technology in mapping landslide hazard. *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards*.
- Carrasco R., Pedraza J., Martín-Duque J., Mattered M., Sanz M., y Bodoque J., 2003. Hazard Zoning for Landslides Connected to Torrential Floods in the Jerte Valley (Spain) by using GIS Techniques. *Natural Hazards* 30.
- Cascini L., 2008. Applicability of landslide susceptibility and hazard zoning at different scales. *Engineering Geology* 102.
- Castellanos E., y Van Westen C., 2008. Qualitative landslide susceptibility assessment by multicriteria analysis: A case study from San Antonio del Sur, Guantánamo, Cuba. *Geomorphology*.
- Chung Ch., y Fabbri A., 2003. Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. *Natural Hazards* 30.
- Comas D., y Ruiz E., 1993. *Fundamentos de los Sistemas de Información Geográfica*. Barcelona: Ariel Geografía.
- Corominas J., Copons R., Vilaplana J., Altimir J., y Amigó J., 2003. Integrated Landslide Susceptibility Analysis and Hazard Assessment in the Principality of Andorra. *Natural Hazards* 30.
- D'Amato G., Giannecchini R., y Puccinelli A., 2004. The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperate climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). *Engineering Geology*.
- Dai F., Lee C., y Ngai Y., 2002. Landslide risk assessment and management: an overview. *Engineering Geology*.
- De Miranda E., 1996. Aplicaciones de los SIG en la zonificación agroecológica y en el manejo de recursos naturales en el Brasil. at Santiago, Chile.
- Demers M., 2000. *Fundamentals of Geographic Information Systems*. EUA: John Wiley y Sons, Inc.
- Di Stefano C., Ferro V., Porto P., y Tusa G., 2000. Slope curvature influence on soil erosion and deposition processes. *Water Resources Research*.

- Doratti M., McColl C., y Tweeddale C., 2002. Landslide Prediction Study. British Columbia: BCIT Geographic Information Systems Advanced Diploma Program.
- Etxeberria P., Edeso J., y Brazaola A., 2005. Metodología para crear mapas de peligros naturales en Guipúzcoa utilizando SIG. *GeoFocus*: 250-267.
- Falaschi F., Giacomelli F., Federici P., Puccinelli A., D' Amato G., Pochini A., y Ribolini A., 2009. Logistic regression versus artificial neural networks: landslide susceptibility evaluation in a sample area of the Serchio River valley, Italy. *Natural Hazards* 50.
- Felicísimo A., 2001. Modelos Digitales del Terreno. Curso de Introducción.
- Felicísimo A., 1994. Modelos Digitales del Terreno. Introducción y Aplicaciones en las ciencias ambientales. Oviedo: Pentalfa Ediciones.
- Felicísimo A., 1999. La utilización de los MDT en los estudios del medio físico.
- Fernández T., Irigaray C., El Hamdouni R., y Chacón J., 2003. Methodology for Landslide Susceptibility Mapping by Means of a GIS. Application to the Contraviesa Area (Granada, Spain). *Natural Hazards*.
- García-Palomo, A., Macías, J., Espíndola, 2004. Strike-slip faults and K-alkaline volcanism at El Chichón volcano, southeastern Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 136
- Ghosh S., Carranza E., Van Westen C., Jetten V., y Bhattacharya D., 2011. Selecting and weighting spatial predictors for empirical modeling of landslide susceptibility in the Darjeeling Himalayas (India). *Geomorphology* 131.
- Glade T., 2003. Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *CATENA* 51.
- Guzzetti F., Carrara A., Cardinali M., y Reichenbach P., 1999. Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *Geomorphology* 31.
- Hengl T., Gruber S., y Shrestha D., 2003. Digital Terrain Analysis in ILWIS. Netherlands.
- Hernández J., Méndez A., Bollo M., 2012. Análisis morfoestructural del relieve noroccidental del estado de Chiapas, México., *Revista Geográfica Venezolana*, Vol. 53(1).
- Hernández J., Bollo M., Méndez A., y Figueroa J., 2009. Formación y morfogénesis del relieve del extremo noroccidental del estado de Chiapas, México. *Investigaciones Geográficas*, Boletín, núm. 68, Instituto de Geografía, UNAM, México.
- Hernández V., 2009. Deslizamientos. Paper presented at Taller de Peligros Naturales para Comunicadores.

- Hervás J., Barredo J., y Lomoschitz A., 2002. Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante GIS, teledetección y métodos de evaluación multicriterio. Aplicación a la depresión de Tirajana (Gran Canaria). Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas GIS.
- Irigaray C., Fernández T., El Hamdouni R., y Chacón J., 2007. Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix method: examples from the Betic Cordillera (southern Spain). *Natural Hazards* 41 (1): 61-79.
- Jiménez-Perálvarez J., Irigaray C., El Hamdouni R., y Chacón J., 2009. Building models for automatic landslide-susceptibility analysis, mapping and validation in ArcGIS. *Natural Hazards* 50.
- Kamp U., Bolch T., y Olsenholler J., 2003. DEM Generation from ASTER Satellite Data for Geomorphometric Analysis of Cerro Sillajhuay, Chile/Bolivia.
- Kamp U., Owen L., Growley B., y Khattak G., 2010. Back analysis of landslide susceptibility zonation mapping for the 2005 Kashmir earthquake: an assessment of the reliability of susceptibility zoning maps. *Natural Hazards* 54.
- Karadogan S., y Yildirim A., 2005. Fault Zone Landslides: The effects and geomorphological characteristics of Koyulhisar (Syvas-Turkey) Landslide, March 2005.
- Keller E., y Blodgett R., 2007. *Natural Hazards: Earth's Processes as Hazards, Disasters and Catastrophes.*: Pearson Prentice Hall. USA.
- Komac M., 2006. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. *Geomorphology* 74.
- Krejčí O., Baron I., Bíl M., Hubatka F., Jurová Z., Kirchner K., 2002. Slope Movements in the Flysch Carpathians of Eastern Czech Republic triggered by extreme rainfalls in 1997: a case of study. *Physics and Chemistry of the Earth* 27. Pergamon.
- Li Ch., Ma T., y Zhu X., 2010. aiNet and GIS based regional prediction system for the spatial and temporal probability of rainfall triggered landslides. *Natural Hazards* 52.
- Longley P., Goodchild M., Maguire D., y Rhind D., 2001. *Geographic Information Systems and Science.* Great Britain: John Wiley y Sons, LTD.
- Lugo J., 1999. *La Superficie de la Tierra II. Procesos Catastróficos, Mapas. El Relieve Mexicano.* México: FCE.
- Lugo J., 1990. El relieve de la República Mexicana. *Revista del Instituto de Geología, UNAM, México*, vol. 9(1), pp. 82-111.

- Magliulo P., Di Lizio A., Russo F., y Zelano A., 2008. Geomorphology and landslide susceptibility assessment using GIS and bivariate statistics: a case study in southern Italy. *Natural Hazards* 47.
- Morán-Zenteno D., Martiny B., Tolson G., Solís G., Alba L., Hernández-Bernal M. del S., Macías C., Martínez R., Schaaf P., Silva G., 2000. Geocronología y características geoquímicas de las rocas magmáticas terciarias de la Sierra Madre del Sur; *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, T. LIII, No. 1, pp. 27-58
- Moreiras S., 2005. Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza Valley, Argentina. *Geomorphology* 66.
- Neaupane K., y Piantanakulchai M., 2006. Analytic network process model for landslide hazard zonation. *Engineering Geology* 85.
- Nefeslioglu H., Sezer E., Gokceoglu C., Bozkir A., y Duman T., 2010. Assessment of Landslide Susceptibility by Decision Trees in the Metropolitan Area of Istanbul, Turkey. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Neuhaüser B., y Terhorst B., 2007. Landslide susceptibility assessment using weights of evidence applied to a study area at the Jurassic escarpment (SW-Germany). *Geomorphology* 86.
- Ohlmacher G., 2007. Plan curvature and landslide probability in regions dominated by earth flows and earth slides. *Engineering Geology* 91.
- Olaya V., 2004. *Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno. Teoría, Práctica y Filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico*. Madrid.
- Ortega-Gutiérrez F., Mitre L., Roldán J., Arada J., Morán D., Alaníz S., y Nieto A., 1992. *Carta geológica de la República Mexicana a escala 1: 2 000 000, UNAM Y CRM, 5ª ed., México*
- Ortiz M., Hernández J., y Figueroa J., 2007. Geología, en Ordenamiento ecológico territorial de la zona petrolera de la región V Norte de Chiapas, T. 1, pp. 14-36
- Padilla y Sánchez, R., 2007. Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. T. LIX, núm. 1, pp. 19-42
- Parise M., y Wasowski J., 1999. Landslide Activity Maps for Landslide Hazard Evaluation: Three Case Studies from Southern Italy. *Natural Hazards* 20.
- Perotto-Baldivieso H., Thurow T., Smith C., Fisher R., y Wu X., 2004. GIS-based spatial analysis and modeling for landslide hazard assessment in steeplands, southern Honduras. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 103.

- Petrucci O., y Gulla G., 2010. A simplified method for assessing landslide damage indices. *Natural Hazards* 52.
- Pike R., Evans I., y Hengl T., 2009. Chapter 1 Geomorphometry: A Brief Guide. In *Developments in Soil Science Geomorphometry Concepts, Software, Applications*, ed Tomislav Hengl and Hannes Elsevier.
- Plaza G., Abad C., Estevez P., y Herrero E., 2005. Análisis de Susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa en la parroquia Pimampiro-Ecuador.
- Pradhan B., 2010. Remote sensing and GIS-based landslide hazard analysis and cross-validation using multivariate logistic regression model on three test areas in Malaysia. *Advances in Space Research* 45 (10): 1244-1256.
- Pradhan B., y Youssef A., 2010. Manifestation of remote sensing data and GIS on landslide hazard analysis using spatial-based statistical models. *Arabian Journal of Geosciences*.
- Pradhan B., Ab Talib J., y Lee S., 2006. Application of Remote Sensing Data in Determining Regional Landslide Hazard Analysis by Using Logistic Regression Model and GIS . In press.
- Pradhan B., y Lee S., 2009. Landslide risk analysis using artificial neural network model focussing on different training sites. *International Journal of Physical Sciences*.
- Rapallo R., 2003. Utilización de Sistemas de Información Geográfica para la Seguridad Alimentaria Sostenible en Zonas Marginadas de Honduras, Nicaragua y Guatemala. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos .Departamento de Proyectos y Planificación Rural.
- Regmi N., Giardino J., y Vitek J., 2010. Assessing susceptibility to landslides: Using models to understand observed changes in slopes. *Geomorphology*.
- Remondo J., González-Díez A., De Terán J., y Cendrero A., 2003. Landslide Susceptibility Models Utilising Spatial Data Analysis Techniques. A Case Study from the Lower Deba Valley, Guipuzcoa (Spain). *Natural Hazards* 30 (3): 267-279.
- Santacana N., Baeza B., Corominas J., De Paz A., y Marturí J., 2003. A GIS-Based Multivariate Statistical Analysis for Shallow Landslide Susceptibility Mapping in La Pobla de Lillet Area (Eastern Pyrenees, Spain). *Natural Hazards*.
- Santacana N., 2001. Análisis de la susceptibilidad del terreno a la formación de deslizamientos superficiales y grandes deslizamientos mediante el uso de sistemas de información geográfica. Aplicación a la cuenca alta del río Llobregat. Universitat Politècnica de Catalunya. Departament d' Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i Geofísica.

- Tapas M., Norman K., Victor E., van Westen C., y Kumar V., 2010. Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods. *Geomorphology*.
- Trueba I., 1994. *Primer Curso Internacional de Dirección de Proyectos SIG*. España.: Universidad Politécnica de Madrid.
- Turkelboom F., Poesen J, and Trébuil G. 2008. The multiple land degradation effects caused by land-use intensification in tropical steeplands: A catchment study from northern Thailand. *CATENA* 75.
- Van Westen C., Castellanos E., y Kuriakose S., 2008. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology* 102 (3-4): 112-131.
- Van Westen C., Rengers N., y Soeters R., 2003. Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Natural Hazards* 30.
- Van Westen C., 2000. The Modelling Of Landslide Hazards Using Gis. *Surveys in Geophysics* 21.
- Wan S., Lei T., y Chou T., 2010. A novel data mining technique of analysis and classification for landslide problems. *Natural Hazards* 52.
- Wang H., Sassa K., y Xu W., 2007. Analysis of a spatial distribution of landslides triggered by the 2004 Chuetsu earthquakes of Niigata Prefecture, Japan. *Natural Hazards*.
- Wilson J., y Gallant J., 2000. *Digital Terrain Analysis*. In *Terrain Analysis: Principles and Applications.*, ed JPyGJC Wilson.
- Xie M., Esaki T., y Zhou G., 2004. GIS-Based Probabilistic Mapping of Landslide Hazard Using a Three-Dimensional Deterministic Model. *Natural Hazards* 33 (2): 265-282.
- Yalcin A., y Bulut F., 2007. Landslide susceptibility mapping using GIS and digital photogrammetric techniques: a case study from Ardesen (NE-Turkey). *Natural Hazards* 41 (1): 201-226.