



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MEXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN GEOGRAFÍA

**INFLUENCIA DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA INESTABILIDAD DE LADERA  
EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CHIQUITO-BARRANCA DEL MUERTO, VOLCÁN PICO  
DE ORIZABA.**

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTORA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:  
ROCIO MARISOL ALANIS ANAYA

DIRECTOR(A) DE TESIS:  
DR. GABRIEL LEGORRETA PAULÍN  
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA, UNAM.

CIUDAD UNIVERSITARIA, Cd.Mx., MAYO 2018.



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.

## Contenido

Resumen .....	4
1. Introducción .....	8
1.1 Marco Teórico .....	10
1.1.1 Impacto del cambio de uso de suelo en el paisaje .....	10
1.1.2 Evaluación del cambio de uso de suelo con percepción remota.....	13
1.1.3 Causas y consecuencias de la inestabilidad de laderas.....	16
1.1.4 Identificación de inestabilidad de ladera con percepción remota.....	22
1.1.5 Relación entre cambio de uso de suelo e inestabilidad de laderas .....	23
1.2 Antecedentes .....	25
1.3 Planteamiento del Problema.....	26
1.4 Justificación.....	27
1.5 Hipótesis.....	28
1.6 Objetivos .....	28
2. Metodología .....	29
2.1 Área de Estudio .....	29
2.1.1 Características de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto .....	32
2.1.2 Geología .....	34
2.1.3 Edafología .....	38
2.1.4 Régimen climático.....	42
2.1.5 Vegetación.....	46
2.1.6 Uso de suelo .....	50
2.2 Materiales y métodos .....	57
2.2.1 Relieve al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto .....	57
2.2.2 Determinación y evaluación de variables cartográficas en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.....	58
2.2.3 Susceptibilidad a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo .....	91
2.2.4 Evaluación de la confiabilidad del mapa de susceptibilidad .....	96
3. Resultados .....	100
3.1 Evaluación del relieve al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto ..	100
3.1.1 Morfometría de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto .....	100

3.1.2 Geformas al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto .....	109
3.2 Variables cartográficas de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.....	118
a) Cambio de cobertura vegetal (2003 y 2012) .....	118
b) Procesos gravitacionales (1994-2012).....	128
c) Erosividad por lluvias (1968-1989).....	132
d) Áreas asociadas con la inestabilidad ladera por cambio de uso de suelo (2012) .....	137
3.3 Susceptibilidad a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo .....	173
3.3.1 Susceptibilidad por clases de intensidad .....	173
3.3.2 Clases de intensidad para procesos gravitacionales (1994-2012) .....	178
3.4 Evaluación de la confiabilidad de los mapas.....	203
4. Discusión.....	209
4.1 Áreas susceptibles a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo .....	209
4.2 Problemáticas y perspectivas .....	209
5. Conclusiones .....	212
Referencias.....	214

## Resumen.

Actualmente el cambio de uso de suelo ha derivado en la inestabilidad del relieve al acelerar los procesos erosivos con actividades agrícolas, forestales, ganaderas e infraestructurales (Bocco et al., 2001). En el Volcán Pico de Orizaba ubicado en el Estado de Veracruz en México, el cambio de uso de suelo ha aumentado debido a programas gubernamentales y a la nula actividad eruptiva que permite la confianza de la población para el establecimiento de áreas agrícolas y urbanas. El objetivo principal de este trabajo fue generar un modelo para mapear la susceptibilidad a procesos gravitacionales en sitios donde ha ocurrido un cambio de uso de suelo. El sitio de estudio fue el interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto, la cual se encuentra al sur del Volcán. Como resultado final se elaboró un mapa de áreas susceptibles a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo, el cual tiene una confiabilidad del  $87.42 \% \pm 3.24$ . El mapa se obtuvo por medio de una evaluación multicriterio y una suma lineal ponderada que considera el cambio de uso de suelo (2003-2012), la incidencia de procesos gravitacionales (1994-2012), la erosividad de lluvias (1968-1989) y las áreas asociadas a procesos gravitacionales por uso de suelo actual al interior de la subcuenca.

El proceso para obtener los mapas que se utilizaron para la suma lineal ponderada, partió de la identificación de geformas al interior de la subcuenca, la cual se realizó con ayuda de un modelo digital de elevación (MDE), curvas de nivel (20 m), ortofotos (1:40,000), carta geológica minera (1:250,000) e imágenes de Google Earth (23/01/2011). El resultado fue un mapa de geformas integrado por quince unidades: Coladas de lava (Años 1545, 1566 y 1613), Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.), Laderas cubiertas por flujo piroclástico (8200 años A.P.), Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.), Colada de lava (16,500 años A.P.), Rampa piroclástica (16,500 años A.P.), Relicto de colapso (290-210 Ka), Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka), Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno), Ladera de montaña de calizas (Cretácico), Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno), Piedemonte 3-6° (Mioceno-Plioceno), Piedemonte < 3° (Mioceno-Plioceno), Rampa fluvio-glacial (Holoceno) y Valles fluviales.

Posteriormente, se generaron dos mapas de uso de suelo (2003 y 2012) con confiabilidad cercana al 80%, en ellos se identificó la presencia de nueve clases: Nieve y hielo, suelo sin vegetación aparente, pastizal de alta montaña, bosque de coníferas, bosque de pino-encino, bosque de latifoliadas, matorral inerme, agricultura y asentamientos humanos; esta clases se obtuvieron a través de una clasificación supervisada con máxima verosimilitud, utilizando regiones de interés en

gráficos de dispersión en imágenes de satélite (SPOT de 10 x 10 m para 2003 y 2012). El cambio de uso de suelo entre ambos años, se consideró por las áreas que permanecieron estables, se degradaron o se recuperaron en términos de su vegetación natural; con ello fue posible determinar que la clase agricultura ha ido en aumento (1.89 km<sup>2</sup>) mientras que el bosque de coníferas fue la clase que más degradación tuvo (2.64 km<sup>2</sup>).

La incidencia de procesos gravitacionales se obtuvo a partir de análisis de percepción remota (ortofotos 1:75,000 (1995), ortofotos 1:40,000 (2008), índice de vegetación de diferencia normalizada con imágenes SPOT 2003 y 2012 e imágenes de Google Earth (23/01/2011), y la integración de un inventario de deslizamientos (Legorreta et al., 2014). En total fue posible ubicar 483 eventos clasificados como deslizamientos de asentamientos profundos, deslizamientos de escombros, deslizamientos someros superficiales, flujos de escombros, flujos de tierra y volcaduras-caída de rocas. Los procesos gravitacionales que más incidencia tuvieron son los deslizamientos someros superficiales (228 eventos), los flujos de escombros (100 eventos) y los deslizamientos de escombros (80 eventos); no obstante, fueron las volcaduras y caída de rocas los eventos que más superficie removieron (236,780 km<sup>2</sup>). Las geoformas más afectadas fueron la rampa piroclástica indiferenciada (257 eventos), las laderas de montaña de roca caliza (109 eventos) y los lomeríos de roca caliza (82 eventos).

Para conocer la erosividad de lluvias se obtuvieron datos de precipitación de 1968 a 1989. Los datos se obtuvieron de ocho estaciones climatológicas: Chilapa, Guadalupe Potrereros, Maltrata, Naranja (CFE), San Isidro Canoas, Sumidero, Tetelzingo y Tlachichuca. Sin embargo, dado que no se obtuvieron series completas, se procedió a realizar una reconstrucción de datos a partir del método de razones promedio (Pizarro et al., 2003), y se aplicaron promedios móviles para suavizar los datos. Con esto se determinó que la temporada de lluvias ocurre entre los meses de mayo a octubre y las áreas al este de la subcuenca son las que más precipitación reciben. Así, con estas series de lluvias históricas se calculó el índice de Fournier modificado (Arnoldus, 1980); el cual indicó que para la subcuenca la erosividad de la lluvia es de alta a muy alta y se presenta una mayor erosividad en las áreas que se ubican al este.

Por último, las áreas asociadas a procesos gravitacionales por uso de suelo actual al interior de la subcuenca fueron obtenidas a partir de trabajo de campo considerando información del uso de suelo actual, edafología, relieve y vegetación. La elección de estas variables responde principalmente a la

variabilidad geomorfológica del sitio de estudio y las implicaciones microambientales que esto conlleva, es por ello que en total se consideraron 32 variables en 96 puntos de muestreo introducidos solo en vegetación natural, estas variables se asocian al uso de suelo actual en cuanto a accesibilidad (camino y pendiente), fertilidad edáfica (bases intercambiables, capacidad de agua disponible, capacidad de aireación, capacidad de campo, concentración de humus, fósforo en materia orgánica, nitrógeno disponible y volumen total de poros) y prácticas forestales (abundancia arbórea, actividades pecuarias, cobertura de hojarasca, ocoteo, presencia de cultivos, quema forestal, ramoneo, reforestación, riqueza arbórea, tala de árboles y talla arbórea máxima); y respecto a la inestabilidad de ladera en relieve (orientación de ladera, pendiente, proximidad a los procesos gravitacionales, protección arbórea al relieve y distribución de la red hídrica) y estructura edáfica (conductividad hidráulica, densidad aparente, erosionabilidad, estabilidad de agregados, profundidad de raíces y textura del suelo). Asimismo, dichas variables se correlacionaron con 14 índices de percepción remota y 5 composiciones de falso color con las bandas rojo, verde y azul (RGB por sus siglas en inglés) para obtener su distribución espacial en toda la subcuenca. Finalmente, a partir de las distribuciones de cada variable, se procedió a realizar sobreposiciones difusas para obtener las áreas asociadas a procesos gravitacionales por uso de suelo actual. Los resultados mostraron una menor propensión para las geoformas que se ubican al interior del Parque Nacional Pico de Orizaba, en tanto que la mayor propensión se da básicamente todas las geoformas restantes, lo cual no quiere decir que todas las variables actúan de la misma forma, ya que en cada geoforma influyen diferentes variables con diferente intensidad.

Estos resultados indicaron que la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto corresponde a un área con un uso de suelo extensivo e intensivo, en el que predominan el establecimiento de campos agrícolas y actividades pecuarias, el ramoneo, ocoteo y tala de árboles; y el aumento del uso de suelo urbano en áreas cercanas a Ciudad Mendoza y Nogales. Dado lo anterior, la susceptibilidad a la formación de nuevos procesos gravitacionales por cambios de uso de suelo, es más alta en las geoformas de rampa piroclástica indiferenciada y ladera de montaña de roca caliza; es por ello que se requiere de la participación de agentes gubernamentales y sociales, así como científicos, personal académico y comunidades al interior de la subcuenca; los cuales diseñen estrategias para la concientización de un responsable aprovechamiento agrícola-forestal encaminado al enriquecimiento de una cubierta de vegetación natural que protege al relieve del impacto de las

lluvias. Siendo así, el mapa de áreas susceptibles a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo, representa la base para ubicar las áreas en donde deben comenzar estrategias de mitigación contra procesos gravitacionales derivados del cambio de uso de suelo.



## **“INFLUENCIA DEL CAMBIO DE USO DE SUELO EN LA INESTABILIDAD DE LADERA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO CHIQUITO-BARRANCA DEL MUERTO, VOLCÁN PICO DE ORIZABA”.**

### **1. Introducción**

Los cambios de uso de suelo para el establecimiento de campos agrícolas y áreas urbanas tienen una relación directa con el aumento de los procesos gravitacionales en sitios con topografía abrupta, litología friable y altas precipitaciones (Chen y Huang, 2013; Kipkosgei-Kilimo, 2014; Reichenbach et al., 2014). En México estos cambios han transformado grandes extensiones de vegetación natural. Por ejemplo, en 1976 el 78% del territorio estaba cubierto por vegetación natural, pero éste disminuyó a 71% en el año 2000, mientras que las zonas agrícolas y urbanas aumentaron de 21% a 28% (Velázquez et al., 2002). En el volcán Pico de Orizaba, los cambios de uso de suelo se deben principalmente a: 1) extracción de pino y encino, 2) desarrollo agrícola, 3) extracción de material para construcción, 4) construcción de ductos petroleros y 5) crecimiento de zonas urbanas (Cuanalo y Melgarejo, 2002; Ellis y Martínez, 2010; Villegas et al., 2011).

Estas alteraciones en la vegetación natural sumadas a las fuertes lluvias estacionales, han contribuido al aumento de la erosión del suelo y a la carga de sedimentos por procesos gravitacionales en el sistema hídrico del Pico de Orizaba. Por ejemplo, en 1974, un programa gubernamental permitió una intensa deforestación para establecer zonas agrícolas al NE del volcán, lo cual favoreció la erosión del suelo desnudo con la presencia de fuertes lluvias. Esta situación causó la formación de un barranco de 3 m de ancho x 350 m de largo x 4 m de profundidad. En 1982, el barranco había aumentado su extensión a 1,7 km de largo x 40 m de profundidad (Werner, 1996). Lo anterior muestra el peligro en que viven las comunidades en las laderas del volcán, tal como ocurrió en 2003 al interior de la subcuenca Río Chiquito-Barranca del Muerto, cuando lluvias excepcionales (260 mm en 24 horas) ocasionaron la formación de un flujo de escombros, que inundó un área de aproximadamente 5 km<sup>2</sup>; lo cual derivó en pérdidas humanas y daños económicos (El Universal, 2003; CFE, 2006; Rodríguez et al., 2006).

La mayoría de los trabajos que se han realizado sobre el Volcán Pico de Orizaba se han centrado en su actividad eruptiva o sus productos volcánicos (Carrasco-Núñez, 1993; Palacios, 1999; Sheridan, 2001; De la Cruz Reyna y Carrasco Núñez, 2002; Macías, 2005; Rodríguez, 2006), siendo insuficientes los que consideran inestabilidad de laderas (Werner, 1996; Rodríguez, 2006;

Legorreta-Paulín et al., 2014; Legorreta-Paulín y Lugo-Hubp, 2014; Aceves-Quesada et al., 2016) o cambio de uso de suelo (Werner, 1996; Villegas et al., 2011). Es por ello que el objetivo de este trabajo fue proporcionar un modelo para determinar y mapear la susceptibilidad a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

Siendo así, en este trabajo para evaluar la relación entre el cambio de uso de suelo y la inestabilidad de laderas consideramos el análisis de las siguientes variables cartográficas: áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual (2012), cambio de cobertura vegetal (2003-2012), procesos gravitacionales (1994-2012) y erosividad por lluvias (1968-1989). Las cuales se introdujeron a una evaluación multicriterio que asignó coeficientes de valoración a partir del conocimiento experto para las clases de intensidad de cada variable cartográfica y coeficientes de evaluación por superficies de incidencia para cada geoforma, y se obtuvo una ponderación para cada variable cartográfica. Dicha ponderación se utilizó para realizar una suma lineal ponderada y generar un mapa de susceptibilidad a procesos gravitacionales por cambios de uso de suelo con una precisión de  $87,42\% \pm 3,24$ .

La organización de este trabajo inicia con un marco teórico que contempla las definiciones necesarias sobre el estudio de cambio de uso de suelo, la evaluación de procesos gravitacionales y los aspectos del paisaje que permiten estimar la relación entre el cambio de uso de suelo y la formación de procesos gravitacionales. Se especifica la problemática de dicha relación en el sitio de estudio y se plantea la hipótesis y objetivos de este trabajo. Posteriormente, en la metodología se hace un reconocimiento de las principales características físicas y sociales de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto; además se describen detalladamente los procedimientos para obtener un mapa de geoformas, las variables cartográficas, el mapa de susceptibilidad y la confiabilidad el mismo. También se realizó una discusión de los principales resultados y expectativas del procedimiento que utilizamos en este trabajo. Finalmente, se exponen las conclusiones y recomendaciones que consideramos pertinente compartir para mejorar este trabajo y otros que requieran apoyarse en nuestra metodología.

## **1.1 Marco Teórico**

### **1.1.1 Impacto del cambio de uso de suelo en el paisaje**

El uso de suelo es la clasificación que se le da una superficie para su futura explotación, entre los principales usos de suelo se encuentran: reserva natural, forestal, agrícola, ganadero, urbano, industrial, habitacional y recreativo (Lambin y Geist, 2003).

Por su parte, el cambio de uso de suelo se define como una fuerza funcional en el cambio ambiental global, en otras palabras, es una actividad que consiste en la remoción total o parcial de la vegetación para la ocupación de una superficie en función de su potencial agrícola, ganadero, forestal, industrial o habitacional en todo el mundo (Turner, 2002).

Sin embargo, no todas actividades en que los humanos intervienen en el paisaje son cambio de uso de suelo, también existen las modificaciones a las coberturas, las cuales son cambios sutiles que alteran el orden ecosistémico pero no cambian totalmente su composición; por ejemplo, tala forestal ilegal, pastoreo fuera de potreros, minería subterránea, pozos para extracción de agua, entre otros (Lambin y Geist, 2003).

En el análisis del cambio de uso de suelo no existe una teoría general que nos indique cual es la secuencia que se da previa a la decisión de remover la cubierta original. Los indicios históricos de esta práctica se presentan al inicio de la domesticación de plantas y animales, cuando los humanos comenzaron a cambiar el paisaje en puntos específicos aprovechando la disponibilidad de recursos. No obstante, los cambios más drásticos en las cubiertas vegetales se dieron con el uso de combustibles fósiles, que fueron el punto de partida para la globalización, el capitalismo y la fabricación de nuevas tecnologías; situación que favoreció el deterioro del paisaje con una extensión exponencial de las industrias (Lambin y Geist, 2006).

A nivel mundial se estima que para el año 2002 las actividades humanas habían cubierto el 87% del planeta, lo que representaba la pérdida de la mitad de los bosques que existían hace 8000 años (Richards, 1990; Billington et al., 1996; Lambin y Geist, 2001; Sanderson et al., 2002). Además, se ha calculado que entre 1950 y 1980 se han talado más bosques que durante los siglos XVIII y XIX juntos (Lambin y Geist, 2001).

Siendo así, la vegetación de bosques, praderas y humedales es la que se remueve con más frecuencia transformando el paisaje para el uso agrícola (Lambin y Geist, 2001), estas transformaciones abarcan 1/3 del cambio de uso de suelo mundial y contribuyen a la desertificación

de los suelos (FAO, 2004). Cabe mencionar que de forma natural el proceso de desertificación se realizaría en lapsos de décadas a siglos, pero actualmente el que suceda en cuestión de años se traduce en el abandono de campos agrícolas y más cambio de uso de suelo (Lambin y Geist, 2001; FAO, 2004).

Las consecuencias del cambio de uso de suelo en el paisaje son incuantificables, por tanto, resulta necesario saber qué es lo que motiva a las personas a realizarlo. Actualmente sabemos que la agricultura, ganadería, silvicultura, industrialización y urbanización son los principales motores para el cambio de la cobertura vegetal (Lambin y Geist, 2003); lo que no sabemos es ¿Cuál es el patrón que lleva a las personas a modificar drásticamente su entorno?

Siendo así, para entender el cambio de uso de suelo se necesita tener en cuenta que la decisión de alterar el paisaje se basa en contextos específicos a nivel local, regional y global; esto en función de la obtención de recursos y de la utilización que las personas le dan a su entorno. En la literatura se pueden discernir tres principales factores que no son excluyentes entre sí, que son dinámicos y que explican el cambio de uso de suelo de manera más ordenada: Biofísicos, Sociales y Gubernamentales (Johnson, 1986; Mortimore y Tiffen, 1994; Stone, 1996; Batterbury y Bebbington, 1999; Lambin y Geist, 2001; Myers y Kent, 2001; Sader et al., 2004; Lavorel et al., 2005; McConnell y Keys, 2005; Lambin y Geist, 2006).

- ✓ Los factores biofísicos decisivos para cambiar un uso de suelo son litología, morfología, pendiente, hidrología, tipo de suelo y fertilidad de la tierra (Stone, 1996; Lambin y Geist, 2001; McConnell y Keys, 2005). Además, el tipo de vegetación previa también resulta atrayente, por ejemplo, la presencia de un bosque conservado indica que existe una buena calidad del suelo, una pendiente suave, un manantial cerca y por supuesto una alta densidad de madera comercial; no obstante, si se encuentra un fragmento de bosque que no cumpla con esas condiciones, el cambio de uso de suelo es menos probable tal como ocurriría si se encontrara en una ladera escarpada (Lavorel et al., 2005).
- ✓ Los factores sociales son variados, pero principalmente son la escasez de recursos, el sentimiento de vulnerabilidad a pérdidas materiales y cambios en la organización social (Lambin y Geist, 2006). Dentro de esos factores la decisión puede cambiar en función de la edad o sexo, por ejemplo, si en Yucatán aumentara la población varonil en etapa de reproducción, habría una mayor probabilidad de que incrementara la tala forestal al haber una mayor demanda de recursos para alimentar a su descendencia (Sader et al., 2004). Otro

es el consumismo por moda, que contribuye a la demanda de campos agrícolas, vías de comunicación y materia prima para su elaboración; los ejemplos más recientes son la alta demanda en ropa de algodón, lácteos, té, cerveza y tabaco, destacando este último porque se le atribuye el 5% de las pérdidas netas de bosques; ya que conforme aumento su demanda el proceso de secado natural de la hoja se modificó utilizando enormes cantidades de carbón y madera; para lo cual se hizo una transformación masiva a suelos agrícolas en países con bajos ingresos de zonas tropicales (Lambin y Geist, 2006).

- ✓ Los factores gubernamentales que influyen en el cambio de uso de suelo, son una consecuencia mediada por instituciones en respuesta de los factores biofísicos y sociales (Lambin y Geist, 2001). Es decir, las decisiones sobre la repartición de usos de suelo, pueden contribuir o reducir el cambio en las cubiertas forestales. Por una parte, contribuyen con reformas de comercio, autorización indiscriminada de usos de suelo para actividades agrícolas e industriales, concesiones forestales, aumento de vías de comunicación, implementación de recursos hídricos, control de precios en productos básicos y repartición de subsidios; decisiones que llevan a una desertificación debido al uso intensivo que se le da a los suelos a partir de dichas prácticas (Johnson, 1986; Mortimore y Tiffen, 1994; Myers y Kent, 2001; Lambin y Geist, 2006). Por otro lado, algunas decisiones de los gobiernos han contribuido a la disminución de áreas transformadas en su uso de suelo, tal como ocurre con los programas para el control de la natalidad y la migración, pero también con los decretos de áreas protegidas que restringen o niegan el acceso a zonas de importancia ecológica (Batterbury y Bebbington, 1999; Lambin y Geist, 2006).

En México, de acuerdo con Velázquez et al. (2002) el cambio de uso de suelo se ha intensificado reportando que en 1976 el 78.55% del territorio nacional presentaba vegetación natural, la cual descendió a 71.03% en el año 2000. Para este mismo periodo, el uso de suelo antrópico (agrícola, ganadero o urbano) aumento de 21.44% a 28.96% (Velázquez et al., 2002).

Un estudio más reciente ha analizado el cambio de uso de suelo con ayuda de un inventario a escala 1:250,000 realizado por el INEGI entre 1968 y 1986 (digitalizado en 2003); así como con datos reportados en el Inventario Forestal de 2000 por parte del Instituto de Geografía de la UNAM. Dicho estudio expone que entre los años 1976 y 2000 se han deforestado 20,000 km<sup>2</sup> de bosques templados, 60,000 km<sup>2</sup> de bosques tropicales y 45,000 km<sup>2</sup> de matorrales; siendo Yucatán, Chiapas, Nuevo León y Tamaulipas los estados con mayor deforestación (Mas et al., 2004).

Aunado a lo anterior Rosete et al. (2008), observa que la principal causa del cambio de uso de suelo que se ha detectado para México es la obtención de terrenos viables para la agricultura, las actividades pecuarias y la urbanización, utilizando técnicas de roza, tumba y quema para el desmonte agropecuario.

No obstante, es necesario mencionar que a finales de la década de 1980 cuando ocurrió la liberación económica y la globalización del Tratado de Libre Comercio, la transformación de suelos con vegetación natural a suelos agroindustriales tuvo un impacto inmediato en la alteración de bosques, ya que campesinos sin tenencia de la tierra tomaron terrenos cercanos a sus bordes (Baber y Schweithelm, 2000).

En el caso del estado de Veracruz se ha reportado que la expansión de las actividades agrícolas y ganaderas a partir de la década de 1970 ha disminuido drásticamente la vegetación natural del estado; por ejemplo, para la zona de los Tuxtlas en 1972 existían 97,015ha de vegetación compuesta por selva húmeda, bosque mesófilo, bosque de pino y bosque de encino, la cual se redujo a 54,281 ha en 1993 (Guevara et al., 2004). Sin embargo, la vegetación más afectada es la selvática ya que hace aproximadamente 90 años se tenían 250,000ha que se redujeron a 40,000ha entre los años 1967 a 1986, lo que indica una pérdida del 84% de esas selvas (Dirzo, 1991; Dirzo y García, 1992)

Como se ha visto en este apartado, el cambio de uso de suelo es un proceso complejo en el que intervienen muchos factores a diferentes intensidades; lo cual dificulta su análisis no solo en términos de estimaciones de cobertura sino en función de su causa, complicando la búsqueda de una solución que contribuya a la disminución tan acelerada en la pérdida de ecosistemas a nivel mundial. No obstante, el estudio a nivel local de los factores que lo ocasionan si favorece la reducción de las tasas de deforestación en una pequeña parte de nuestro planeta (Lambin y Geist, 2003).

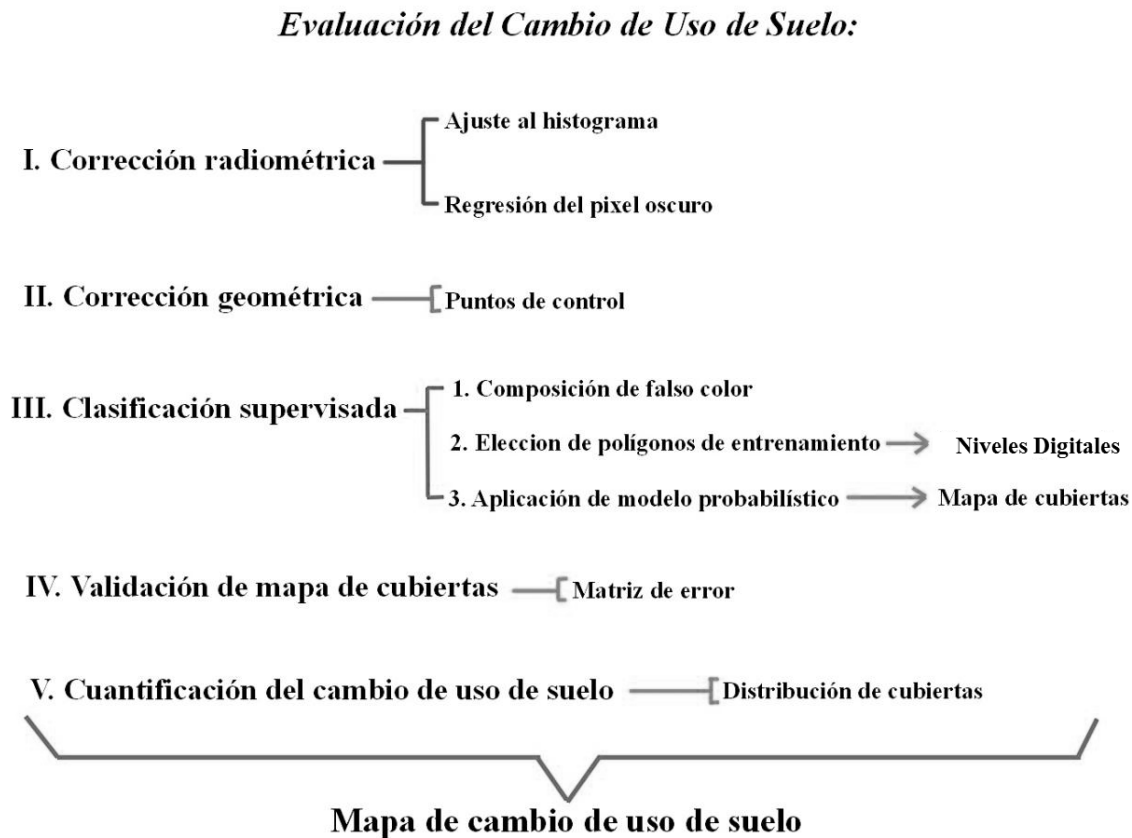
### **1.1.2 Evaluación del cambio de uso de suelo con percepción remota**

La evaluación de cambio de uso de suelo se apoya en técnicas de Percepción Remota (PR), partiendo del análisis en la frecuencia y longitud de onda de la radiación electromagnética originada por fuentes naturales (cualquier objeto en el universo) o fuentes de radiación artificial colocadas en los sensores remotos satelitales.

Para comenzar la detección de cambios se requiere evaluar el tamaño del sitio de estudio y de acuerdo a ello seleccionar una secuencia multi-temporal de imágenes satelitales que considere una resolución espacial baja (ASTER, IRS, LANDSAT, MODIS y SPOT) o detallada (IKONOS,

QUICKBIRD y ORBVIEW), además las imágenes deben estar corregidas radiométrica y geoméricamente para que los resultados sean lo más cercanos a las verdaderas modificaciones de la cubierta del suelo y no al ruido atmosférico o problemas de desfases entre imágenes.

El proceso para cada una de las imágenes de satélite de interés es el siguiente (Fig. 1):



**Figura 1.** Resumen del Procedimiento para la Evaluación del Cambio de Uso de Suelo en imágenes satelitales multitemporales.

Inicialmente la imagen de satélite es corregida radiométricamente para eliminar el ruido provocado por las condiciones atmosféricas, lumínicas, geométricas o por errores del sensor satelital, con la finalidad de recuperar la radiancia o reflectancia original. Una de las técnicas para hacer una corrección radiométrica por efectos atmosféricos es el ajuste al histograma, el cual se realiza cuando se tiene el valor de brillantes mínima de una imagen alejado del cero, lo que nos indica una dispersión en la región del azul en el espectro electromagnético; la cual se corrige sustrayendo ese valor mínimo para ajustar el histograma a cero, suponiendo que los pixeles más oscuros deberían tener un valor de brillantez de cero (Schowengerdt, 2007; Campbell, 2011). Otra técnica es la de

regresión con el pixel oscuro para correcciones atmosféricas, ella busca dentro de la imagen elementos que teóricamente tengan una reflectancia cercana a cero (agua limpia o sombras), por lo que los efectos atmosféricos les harían tener valores diferentes a cero y para corregirlo se hace una regresión de una banda del infrarrojo cercano con una banda del visible, y la ordenada de origen será el valor que debe sustraerse en la región del visible (Kaufman et al., 1997; Membrillo, 2011).

A continuación, se necesita realizar una corrección geométrica, transformando las coordenadas de los pixeles a las coordenadas de una imagen de referencia geográfica, por medio de un número alto de puntos de control distribuidos homogéneamente en la imagen; los cuales garantizan una transformación de coordenadas más exacta, por lo que es conveniente que los puntos de referencia sean sitios cuya movilidad espacial es poco probable (Campbell, 2011).

El siguiente paso es hacer una clasificación supervisada para obtener la imagen de cambios, la cual consiste en determinar clases partiendo de un conocimiento previo del área de estudio que se ajuste más con la realidad. Para ello se hace una composición en falso color; la cual se obtiene al sobreponer bandas del visible y del infrarrojo dependiendo del elemento que se quiera resaltar (agua, suelo o vegetación). En esta composición de falso color se eligen pixeles que representan cada una de las cubiertas de interés o “clases”, lo que permitirá tener polígonos de entrenamiento; a partir de los cuales se obtendrán las firmas espectrales para cada cubierta. Posteriormente, se utiliza un modelo probabilístico que evalúe la probabilidad de que un pixel pertenezca a cada una de las clases con lo cual se obtendrá un mapa de distribución de clases o cubiertas con una resolución espacial igual a la de la imagen de satélite utilizada (Richards y Xiuping, 2006; Campbell, 2011).

Finalmente, se realiza una validación para comprobar la confiabilidad de la clasificación, dicha validación se hace con una matriz de error con datos de referencia obtenidos de muestreos de campo y de la categorización de pixeles que se realizó previamente en cada cubierta de suelo. Los resultados muestran en la diagonal de la matriz al número de pixeles correctamente clasificados y en el resto de la matriz a los erróneos. Como resultado se obtiene una validación de cada imagen de satélite analizada (Cogalton, 1991).

Actualmente para el estudio del deterioro de la vegetación, los mapas obtenidos del análisis con PR se integran en Sistemas de Información Geográfica (SIG) a través de los cuales se puede realizar la captura, el almacenamiento, la manipulación y el análisis de más datos espaciales pertenecientes a otras fuentes cartográficas. Así, este proceso contribuye a la evaluación del cambio de coberturas, inestabilidad, modelado o cartografía de un fenómeno específico apoyándose en una imagen en la



que se mostrara la distribución espacial de los cambios de uso de suelo y datos que podrían ser referentes a la geología, geomorfología, hidrología, ecología, ámbito cultural o social de la región analizada (Lambin y Geist, 2003).

Para la región del Volcán Pico de Orizaba en el Estado de Veracruz el uso de la PR y SIG se refleja en un trabajo de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Villegas et al., 2011), el cual analiza el cambio de uso de suelo solo dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba entre los años 2003, 2007 y 2011 utilizando imágenes SPOT. Dicho estudio clasifica 10 tipos de uso de suelo (bosque de oyamel, bosque de pino, bosque de encino, bosque de pino secundario, pradera de alta montaña, pastizal, agrícola, área incendiada, sin vegetación aparente y área urbana) y concluye que el bosque de pino ha sido el más afectado por el cambio de uso de suelo entre 2003 y 2011, transformando su superficie (0.53 ha) a bosque de pino secundario (Villegas et al., 2011).

### **1.1.3 Causas y consecuencias de la inestabilidad de laderas**

La inestabilidad de ladera o remoción en masa es definida como un proceso geomorfológico relacionado con la evolución de los paisajes que se expresa con movimientos masivos de depósitos, rocas, detritos, suelos y vegetación que componen una ladera y que al perder el equilibrio siguen la dirección de la pendiente debido a la fuerza de gravedad, los cuales ocurren tanto en las pendientes abruptas como en las suavizadas y en cualquier tipo de clima (Varnes, 1978; Cruden, 1996; Chacon et al., 2003; Mendoza y Domínguez, 2006; Alcántara et al., 2008).

Los procesos gravitacionales se originan por la influencia de factores externos e internos (Mendoza y Domínguez, 2006). En términos generales los factores externos desencadenan una mayor concentración de fuerzas generadoras como ocurre con las erupciones volcánicas, actividad tectónica, sismicidad, precipitaciones inusuales y actividades antrópicas que involucran deforestación, excavaciones, exploraciones y urbanización de los depósitos; mientras que los factores internos condicionan la resistencia de los materiales, por ejemplo, parámetros geotécnicos, pendientes, tipo de suelo, vegetación y geología; factores que favorecen el intemperismo y erosión por la presencia de fracturas, plegamientos, pérdida de dureza de las rocas y la modificación en la capacidad de infiltración de los materiales (Cruden, 1991; Mendoza y Domínguez, 2006) (Tabla 1).

**Tabla 1.** Características de los factores internos y externos (Modificado de Cuanalo et al., 2002).

<b>Factores</b>	<b>Tipo</b>	<b>Efectos</b>
<b>Factores internos</b>	Morfología y topografía	Influye en la estabilidad ya que a mayor pendiente y altura aumenta el efecto gravitacional.
	Geología y edafología	El grado de alteración de la roca así como la presencia de grietas, fracturas, fallas, planos estratigráficos, porosidad, permeabilidad, propiedades físicas y mecánicas determinan la resistencia al colapso.
	Actividad tectónica	Las vibraciones sísmicas dependiendo de su magnitud y distancia al epicentro originan que los materiales se muevan por colapsos, procesos gravitacionales, flujos o avalanchas.
	Vulcanismo	Las erupciones volcánicas originan procesos gravitacionales y avalanchas, mientras que el deshielo de glaciares produce lahares en las laderas de los volcanes.
	Hidrogeología	El agua en el interior de la ladera disminuye la resistencia cortante al aumentar la presión intersticial e incrementa el peso volumétrico del terreno.
	Vegetación	Las raíces fijan los suelos a los estratos de rocas, absorben el agua del suelo y atenúan la erosión superficial por el impacto de gotas de lluvia o escurrimiento superficial.
<b>Factores externos</b>	Lluvias	Dependiendo de su intensidad, duración y distribución satura los materiales de la ladera, intemperiza y contribuye con el aumento del agua subterránea.
	Congelación y deshielo	Produce expansiones y contracción en grietas y fisuras ocasionando el fracturamiento de los materiales.
	Erosión y socavación	En la cumbre y base de las laderas modifica la tensión de los materiales aumentando las fuerzas cortantes.
	Actividad humana	Cambia la geometría de las laderas por deforestación, excavaciones y construcciones de caminos, presas o casas, lo que ocasiona una sobrecarga en los materiales y una alteración del drenaje superficial.

Además, los movimientos de ladera pueden ser rápidos en el orden de segundos o lentos tardando incluso meses en desarrollarse, lo anterior depende de sus dimensiones, materiales involucrados en el deslizamiento y tipo de plano de deslizamiento; lo que ha llevado a proponer diferentes clasificaciones para los movimientos que caracterizan a la inestabilidad de ladera, destacando Sharpe, 1938, Nemcok et al., 1972, Varnes, 1978, Hutchinson, 1988, Sassa, 1989, Cruden y Varnes, 1996, Dikau et al., 1996 y Mendoza et al., 2000. Esta última es una síntesis de las anteriores determinando tres grupos de movimientos: caídas o derrumbes, procesos gravitacionales y flujos (Mendoza et al., 2000; Mendoza y Domínguez, 2006). A continuación, se presenta la clasificación

de Mendoza et al. (2000) utilizando las figuras esquemáticas de Corominas y García-Yagüe, 1997 por tener mayor simplicidad:

- **Caídas o Derrumbes.**

Son desprendimientos abruptos y rápidos de suelo erosionado y rocas que se originan en pendientes pronunciadas y escarpes, por lo que los fragmentos tienen una caída libre, ruedan y rebotan. Se identifican por la ausencia de vegetación en laderas con pendientes de entre 20 y 30° o en paredes verticales. Las caídas o derrumbes se dividen en dos:

- ✓ *Desprendimientos.* Consisten en caída de suelos y bloques rocosos debido a erosión, son resultado de grietas, planos de estratificación o fracturamiento (Fig. 2a).
- ✓ *Vuelcos o Volteos.* Se trata de caída de bloques de roca que giran adelante y hacia afuera, consecuencia de grietas de tensión, grietas verticales o diaclasas (Fig. 2b).



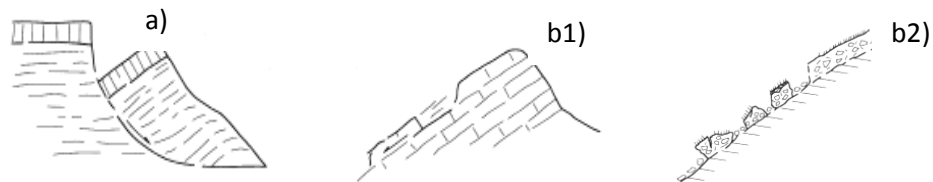
**Figura 2.** Esquema de caídas y derrumbes. a) Desprendimiento. b) Vuelcos (Corominas y García-Yagüe, 1997).

- **Deslizamientos.**

Son movimientos de rocas y suelo que siguen la pendiente del terreno, se delimitan por superficies de ruptura que favorecen el descenso de materiales sobre una ladera estable. Se diferencian dos tipos:

- ✓ *Rotacionales.* Son movimientos que arrastran los materiales a través de una superficie de falla cóncava, en ellos masas de suelo y fragmentos inestables rotan hacia atrás en un eje paralelo a la ladera. Son comunes en suelos arcillosos o en depósitos de rocas intemperizadas, dejan una forma cóncava en su cabecera y una convexa en el depósito frontal del deslizamiento; también se conocen como deslizamientos de asentamiento profundo (Fig. 3a).

- ✓ *Translacionales.* Masas de suelo y fragmentos de rocas que tienen un desplazamiento paralelo a la ladera sobre una superficie de falla plana (diaclasas o planos de estratificación), por lo que resulta imperceptible una rotación de los materiales deslizados. Se caracterizan por tener una cabecera plana y poco profunda con una superficie caótica frontal y una gradación en el tamaño de los bloques respecto a la distancia, pueden ser deslizamientos someros superficiales (Fig. 3b1) o tener superficies débiles en la formación rocosa donde se generen lo cual produce un plano de deslizamiento más profundo y un movimiento constituido por suelos no cohesivos y fragmentos rocosos denominado deslizamiento de derrubios (Fig. 3b2).



**Figura 3.** Esquema de Deslizamientos. a) Rotacional. b) Translacionales. b1) Deslizamiento somero superficial. b2) Deslizamiento de derrubios (Corominas y García-Yagüe, 1997).

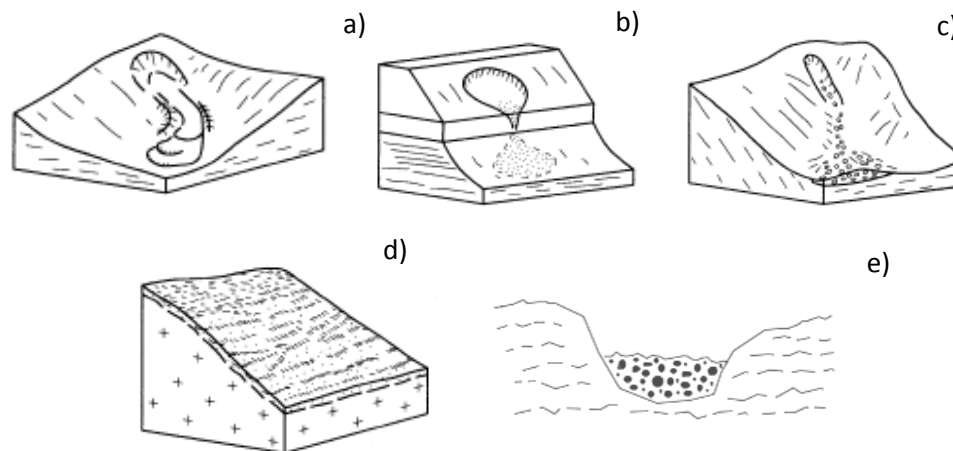
- **Flujos.**

Son movimientos viscosos de unidades deformadas de suelos y rocas no consolidadas a través de una ladera o cauce siguiendo la pendiente, es común que sus fragmentos se muevan sobre una superficie de falla o en el interior de la masa desplazada. Se clasifican en cinco tipos:

- ✓ *Flujo de lodo.* Es una combinación de suelo y agua que fluye rápidamente ( $> 3$  m/seg.), conteniendo en flujo 50% de arena y limo; son más comunes en la época de lluvias y se identifican por dejar una superficie cóncava con un área acumulativa plana y lobulada que sobresale del cauce por el que descendió (Fig. 4a).
- ✓ *Flujo de tierra o suelo.* Es una mezcla blanda de suelo que fluye relativamente rápido (1.8 m/hora) con un 50% de grava, arena y limo, sobre una superficie de falla con deformación interna inicial (Fig. 4b).
- ✓ *Flujo de detritos.* Es una masa viscosa (1.5 m/día a 1.8 m/hora) que contiene suelo, fragmentos rocosos, vegetación y agua (escombros). Sucede cuando el contenido de agua intersticial aumenta y ocasiona una pérdida de cohesión entre los materiales (licuefacción) que facilita el movimiento de ladera, el cual fluye por laderas abiertas o fluye por

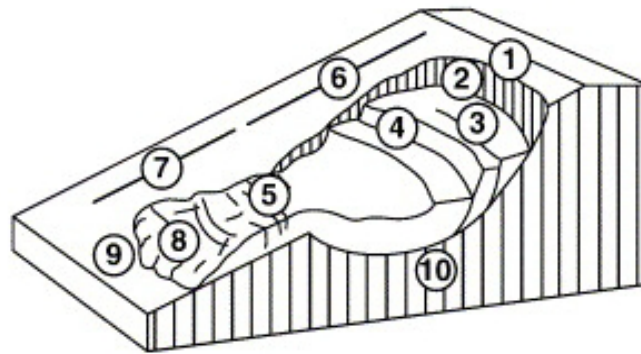
hondonadas en el terreno deteniéndose al perder agua. En ellos se observa una amplia cabecera escarpada y muchas concavidades en la superficie del depósito (Fig. 4c).

- ✓ *Reptación o flujo muy lento.* Es un movimiento de ladera constante de poca velocidad (0.05 a 0.016 m/año) que arrastra suelo y rocas, en el cual no se puede identificar fácilmente la superficie de falla; sin embargo, si se pueden observar árboles con arqueamiento en la base, postes inclinados, agrietamiento del suelo y formación de terracetas o escalonamientos. Ocurre por periodos de humedecimiento y desecación; congelamiento y descongelamiento; actividad de la microfauna del suelo y animales excavadores; y por pisoteo del ganado (Fig. 4d).
- ✓ *Lahar.* Es una corriente rápida ( $> 0.3$  m/seg.) de ~20% de bloques y sedimentos con alta permeabilidad, saturados con el 80% de agua (Capra et al., 2010). Pueden ser hiperconcentrados en forma de mezclas fluidas de agua y sólidos granulares con 35 a 40% de su volumen en partículas sólidas; o también pueden expresarse como flujos de escombros que contienen una mezcla fluida de agua y sólidos granulares con un volumen de 55 a 60% de partículas sólidas (Delgado et al., 2002). Se caracteriza por fluir al interior de los cauces en laderas de un volcán, su origen son las lluvias intensas, deshielo de glacial por actividad volcánica o desbordamiento de represas de agua, al depositarse rellena cauces con superficies planas, compactas, levees y acumulaciones de bloques (Smith et al., 1989) (Fig. 4e).



**Figura 4.** Esquema de Flujos. a) Lodo. b) Tierra. c) Detritos. d) Reptación. e) Lahar (Corominas y García-Yagüe, 1997).

Una vez que la remoción en masa se detiene puede dejar expuestos depósitos con características masivas de hasta varios metros de espesor sin horizontes internos, depósitos heterométricos con fragmentos de muchos tamaños y depósitos de talud con fragmentos angulosos en la base de la ladera. Estos depósitos también ocasionan cambios morfológicos en las laderas, por ello se han diseñado esquemas que permiten identificar cada uno de los cambios que se presentan en las laderas; algunos de los cuales se pueden observar en otros tipos de remoción en masa. A continuación se muestra la estructura general de un movimiento de ladera propuesta por Varnes, 1978 (Fig. 5); sin embargo, es necesario mencionar que no siempre son evidentes todos los elementos al estar frente al movimiento de ladera (Alcántara et al., 2008).



**Figura 5.** Estructura general de un movimiento de ladera (Varnes, 1978).

1. Corona. Se encuentra sobre el deslizamiento y puede tener algunas grietas, pero no presenta superficie de falla.
2. Escarpe principal o cabecera. Es una superficie con una pendiente abrupta, es el límite entre la ladera y el deslizamiento.
3. Tope. Es el punto más alto entre el material que se desplazó y el escarpe principal.
4. Escarpe menor. Posee una pendiente alta en el material removido y ocurre cuando hay un movimiento diferencial del material que se desplazó.
5. Cabeza. Representa la parte superior del material removido perpendicular al escarpe principal.
6. Cuerpo principal. Muestra la parte superior del material colapsado que se localiza sobre la superficie de falla entre el escarpe principal y la punta de la superficie de ruptura.

7. Pie. Es el material desplazado que se encuentra entre la punta de la superficie de ruptura y el sitio más alejado al que llega pendiente abajo.
8. Dedo. Es el margen lateral e inferior del deslizamiento que se encuentra más alejado del escarpe principal.
9. Punta. Es la zona más distante del tope de deslizamiento.
10. Superficie de ruptura. Es la intersección de la parte baja entre la superficie de falla y la superficie original del terreno.

Teniendo presente lo anterior y de acuerdo con Daniels y Hammer (1992), es posible reconocer cuando los procesos gravitacionales aún se encuentran activos o ya no tienen movimiento. Siendo así, un deslizamiento activo se caracteriza por presentar escarpes, terrazas y grietas con bordes agudos; grietas y depresiones sin relleno; bloques con superficies de fractura frescas; no tiene desarrollo de suelo en la superficie de ruptura expuesta; ausencia de cobertura vegetal a excepción de algunas especies pioneras sobre los depósitos expuestos; y presencia de árboles inclinados sin crecimiento vertical reciente (Daniels y Hammer, 1992). Por otro lado, en el caso de los procesos gravitacionales inactivos las características antes mencionadas se invierten y se observan escarpes, terrazas y grietas con bordes redondeados; grietas y depresiones rellenas con nuevo sedimento; bloques redondeados; drenaje evidente; un desarrollo de suelo sobre la superficie de ruptura; la cubierta vegetal es similar dentro y fuera del deslizamiento; y los árboles inclinados crecen en posición vertical dejando una zona de su tronco torcida por la inclinación (Daniels y Hammer, 1992).

#### **1.1.4 Identificación de inestabilidad de ladera con percepción remota**

En el análisis de procesos gravitacionales al igual que en el de cambio de uso de suelo, las imágenes de satélite junto con las fotografías aéreas son una herramienta útil para identificar áreas con algún tipo de remoción en masa. En el caso de las fotografías aéreas se utilizan escalas de 1:25,000 a 1:10,000, en las cuales se realiza una fotointerpretación que posteriormente se traza sobre una imagen de satélite con resolución espacial de 5 m, en la cual es posible localizar procesos gravitacionales de hasta 10 m de ancho por 50 m de largo, además de ver zonas escarpadas, topografía escalonada y cambios de pendiente gracias a la estereoscopia; sin embargo, para zonas con vegetación densa la identificación se complica a cualquier escala al solo poder determinar un 15% de procesos gravitacionales registrados en campo (Brardinoni, 2003; Van Den Eeckhaut et al., 2005).

Por otro lado, en las imágenes de satélite la resolución espacial que se utiliza es de 30m para pixeles Landsat o de 5m en imágenes SPOT, en ellas se ubican principalmente zonas de suelo sin vegetación aparente con un perímetro de vegetación conservada o relieves sombreados a partir de un MDE de 5 m de resolución (INEGI, 2006), el cual es útil en zonas de poca vegetación; con esta información se puede hacer una clasificación supervisada y conocer la distribución de áreas con procesos gravitacionales (Metternicht et al., 2005; Van Den Eeckhaut et al., 2005).

Para completar el análisis se requiere de la verificación de los procesos gravitacionales en campo, a partir del cual se harán las correcciones requeridas sobre las imágenes de satélite en un Sistema de Información Geográfica (SIG), en él se integrará información obtenida en campo (tipo de deslizamiento, dimensiones, pendiente, geología y edafología) y se procederá a la cuantificación del área con inestabilidad de ladera (Metternicht et al., 2005; Van Den Eeckhaut et al., 2005).

### **1.1.5 Relación entre cambio de uso de suelo e inestabilidad de laderas**

Como se explicó en el subcapítulo 1.1.1, el cambio de uso de suelo no sigue un proceso estructurado en el que se sean evidentes las fases que llevan a la decisión de cambiar una cubierta vegetal natural, pero si han sido evidentes diversos impactos entre los que destacan la deforestación, degradación, desertificación y pérdida de biodiversidad (Lambin et al., 2001).

Cuando se relaciona el cambio de cubiertas con la inestabilidad de laderas, los resultados son producto de una secuencia de eventos que involucran de manera estrecha la disponibilidad de agua superficial y subterránea en los intersticios de los materiales que conforman la ladera; por lo que a nivel local se observa que las consecuencias del cambio de uso de suelo ocurren como un proceso paralelo al modelado hídrico en laderas (Schaetzl y Anderson, 2005):

1. Erosión pluvial. Esta fase comienza cuando una cubierta vegetal es removida dejando el suelo desnudo en superficies cumbreles con baja pendiente, por lo que al iniciar las lluvias se observa una desestabilización de los agregados del suelo por el impacto de las gotas de lluvias facilitando la acción de otros tipos de erosión. Es identificable por la presencia de micropedestales.
2. Erosión laminar. Ocurre cuando las lluvias incrementan y el agua satura el suelo ocasionando un flujo superficial con una escorrentía difusa que transporta las partículas de suelo desprendidas en la erosión pluvial. Se puede observar por la pedregosidad del suelo, raíces expuestas y represas de hojarasca.



3. Erosión lineal. En el momento en que las partículas son transportadas pendiente abajo por el flujo superficial de agua, van socavando verticalmente a los suelos expuestos y generan surcos; mismos que al ampliarse vertical y horizontalmente hacia los hombros de las laderas facilitan la formación de cárcavas que generan inestabilidad de laderas. Forman estructuras cóncavas en el caso de los surcos y lobuladas en el caso de las cárcavas.
4. Flujo subsuperficial. A la par de las tres erosiones antes mencionadas, se realiza una erosión interna en los materiales geológicos y edáficos que componen una ladera, la cual está dada por el movimiento del agua infiltrada que se desplaza lateralmente sobre un horizonte impermeable que tiene como salida el lomo y pie de las laderas. Dicha situación favorece el intemperismo, agrietamiento y fracturación de los materiales ocasionando su posterior colapso. Su identificación es por la presencia de manantiales o pequeños escurrimientos de agua en las laderas.

Los tipos de erosión o modelado hídrico antes mencionados, son evidentes en las zonas donde se dio un cambio de cubierta natural y no se propició una nueva cobertura natural del suelo; no obstante, es necesario mencionar que la erosión está determinada por tres tipos de factores físicos: erosividad, erosionabilidad y relieve (Wischmeier et al., 1971).

La erosividad es la capacidad de la lluvia para deteriorar la estructura del suelo, y está influida por la intensidad y la duración de la lluvia. Por otro lado, la erosionabilidad es la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, en ella intervienen la textura, estabilidad de agregados, capacidad de infiltración y la materia orgánica; características que oponen resistencia a la erosión. Por último, el relieve inhibirá la actividad erosiva en laderas extensas con pendientes poco pronunciadas.

Así, para que la erosión se reduzca al mínimo es importante la presencia de una cubierta vegetal sobre los materiales, ya que esta provee de un dosel que disminuye el impacto de las gotas de lluvia; las raíces mantienen la estabilidad de los agregados evitando la erosión laminar; la presencia de un sotobosque disminuye al máximo la formación de surcos y cárcavas; y finalmente una cubierta de vegetación uniforme contribuye a una mejor captación del agua de lluvia, a través de un balance equilibrado de la infiltración, escorrentía y evapotranspiración.

Si bien no se ha llegado aún a un consenso sobre los parámetros, variables, categorías o escalas que deben utilizarse para un análisis que relaciona el cambio de uso de suelo con la inestabilidad de ladera, es posible utilizar métodos multivariantes para tener un acercamiento al fenómeno. Uno de estos métodos es la sobreposición difusa (Pourghasemi et al., 2012), la cual parte del concepto de

lógica difusa que identifica que conforme la complejidad de un sistema aumenta, la precisión al analizarlo disminuye con lo que la precisión y el significado se convierten en características excluyentes, así los elementos que toma el pensamiento humano para realizar un análisis no son números sino etiquetas lingüísticas (Zadeh, 1965). Dado lo anterior, la sobreposición difusa en términos generales se basa en principios de lógica difusa que identifican una problemática de fronteras al asignar un dato continuo en una clasificación cualitativa o semántica. Por ejemplo, al ajustar un conjunto de datos continuos (0-1) a una clasificación equitativa de muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto; el valor continuo 0.199 entraría en la clasificación muy bajo, pero también está muy cercano a la clase baja. Ante esta situación, la lógica difusa permite la posibilidad de que un valor continuo pertenezca a una clase y esté relacionado con el resto de las clases; por ende se habla de que un conjunto de datos continuos tiene una relación difusa o borrosa entre clases cualitativas; así, cualquier fenómeno que sugiera una transición puede ser modelado con lógica difusa (Gutiérrez y Jegat, 2005). En el caso de una imagen de satélite, la lógica difusa se traduce en que un pixel puede pertenecer a distintos intervalos cualitativos, pero con diferentes grados de pertenencia (Tamés et al., 2015).

Siendo así, el procedimiento de sobreposición difusa para identificar sitios de interés comienza con un análisis de grado de pertenencia para distintas variables en formato raster. Este paso es importante ya que el raster es reclasificado a valores de 0 a 1, lo cual al estandarizar (fuzzificar) los raster a una unidad común permite la comparación de distintas variables con diferentes unidades de medida (Garfias et al., 2012). Posteriormente, se realiza una combinación de los raster fuzzificados utilizando diferentes algoritmos de exclusión, inclusión, multiplicación o suma; de acuerdo al interés del investigador. El resultado es un raster con áreas coincidentes para diferentes variables, pero en una escala de 0 a 1 (ESRI, 2016).

## **1.2 Antecedentes**

En México los estudios sobre cambio de uso de suelo se han incrementado debido a la disminución de la cubierta de vegetación natural, la cual ha pasado de 79% en 1976 a 71% en el año 2000 (Velázquez et al., 2002). Dichos estudios analizaron y clasificaron los diferentes tipos de usos asociados a la transformación de la cobertura natural a áreas del aprovechamiento humano, así como el impacto físico, químico y biológico que tienen en su entorno (Bocco et al., 2001). Sin embargo, aún no se ha llegado a un consenso sobre los parámetros, variables, categorías o escalas que se deben seguir para el análisis de cambio de uso de suelo (Palacio et al., 2000). Actualmente

con la prospección de los cambios de uso de suelo, se ha logrado analizar y comparar datos de manera más homogénea; utilizando imágenes donde no solo es posible comparar diferentes fechas sino también realizar una comparación con otros estudios mediante imágenes del mismo satélite; un ejemplo es la técnica de análisis multitemporal con clasificación cruzada, la cual detecta cambios en imágenes corregidas radiométrica y geométricamente con la finalidad de atribuir el cambio de uso de suelo solo a modificaciones en el paisaje y no al ruido en las imágenes (Ruiz, 2006; Pineda, 2009; Williamson, 2009). Por su parte, los procesos gravitacionales han sido identificados y mapeados mediante el uso de fotografías aéreas, ortofotografías digitales, teledetección y trabajo de campo (Hervás y Bobrowsky 2009; Guzzetti, et al., 2012). En el caso del mapeo y predicción de áreas que son potencialmente inestables debido a cambios de uso de suelo se han determinado utilizando modelos de susceptibilidad predictiva y teledetección (Morrissey et al., 2001; Legorreta-Paulín y Bursik 2008; Kipkosgei-Kilimo 2014; Reichenbach et al., 2014).

Cabe mencionar que los procesos gravitacionales también han sido evaluados mediante procesos de jerarquía analítica y la lógica difusa multivariante (Pourghasemi et al., 2012; Kayastha et al., 2013; Tazik, et al., 2014). Sin embargo, en México ambos métodos se utilizan principalmente para analizar imágenes de satélite y generar evaluaciones multicriterio que relacionan variables ambientales, sociales y económicas (Peñalva-Rosales 2000; Olivas-Gallegos et al., 2007; Vigueras-Velázquez et al. 2016); por lo que destaca que estos métodos no se han sido utilizados juntos para evaluar la relación del cambio de uso del suelo y la formación de los procesos gravitacionales.

Por otro lado, los estudios realizados para el Volcán Pico de Orizaba se centran en la actividad eruptiva o asociada a sus productos volcánicos (Carrasco-Núñez, 1993; Palacios, 1999; Sheridan, 2001; De la Cruz-Reyna y Carrasco-Núñez, 2002; Macías, 2005; Rodríguez, 2006); dejando de lado la degradación que ha tenido la vegetación por el cambio de uso de suelo. No obstante, en el sector occidental del Volcán, Ruiz (2006) analizó el cambio de uso de suelo entre 1975 y 1995 en los municipios de Guadalupe Victoria, Tlachichuca, Cd. Serdán y Atzitzintla, a través de una fotointerpretación llevada a un SIG para evaluar la tasa de deforestación en esa zona del estado de Puebla. Este estudio constituye una pieza fundamental para los estudios de cambio de uso de suelo en el Volcán Pico de Orizaba, sin embargo, aún faltan estudios que asocien el cambio de uso de suelo a eventos de remoción en masa en las laderas del Volcán.

### **1.3 Planteamiento del Problema**

En el Volcán Pico de Orizaba el cambio de uso de suelo se ha dado principalmente por cinco causas: La primera fue la extracción de Pino y Encino para la comercialización de madera. La segunda fue el cambio de cubierta vegetal para el aprovechamiento agrícola del suelo, cultivando papa, haba, chícharo, frijol, chile y maíz. La tercera fue la extracción de depósitos piroclásticos para la elaboración de materia prima para la construcción. La cuarta ocurrió con alteración de áreas por la inserción de ductos petroleros y la construcción de carreteras. Finalmente, la quinta correspondió al crecimiento de áreas urbanas en las laderas del Volcán (Cuanalo y Melgarejo, 2002; Ruiz, 2006; Ellis y Martínez, 2010; Villegas et al., 2011). Esta situación ha contribuido a la erosión de los materiales parentales, ya que el cambio de uso de suelo que remueve cubiertas vegetales deja a los suelos expuestos y que en temporada de lluvias intensas puede derivar en la formación de procesos gravitacionales. En la historia reciente del Volcán Pico de Orizaba se han documentado dos eventos de remoción en masa de alto impacto para la población. El primero ocurrió en 1920 cuando un sismo ocasionó el descenso de un flujo de escombros por la ladera este que recorrió 30 km de longitud (Singh et al., 1984; Crausaz, 1994). El segundo evento se generó en el 2003 en la ladera sur al presentarse lluvias excepcionales (260 mm en 24 horas) que derivaron en el descenso de un flujo de escombros por el cauce del Río Chiquito-Barranca del Muerto, el cual inundó un área de aproximadamente 5 km<sup>2</sup>. Dado lo anterior, es necesario mencionar que la vegetación natural contribuye a dar estabilidad a los depósitos volcánicos y reduce los procesos erosivos eólicos (remoción de suelo), gravitacionales (flujos y deslizamientos) e hídricos (erosión laminar, formación de cárcavas y surcos o intemperización de la roca); beneficios que no son otorgados por el uso de suelo agrícola o urbano. Es por ello que la modificación que ocurre en el uso de suelo de las laderas del Volcán Pico de Orizaba junto con la presencia de lluvias intensas, acelera la velocidad e intensidad de procesos erosivos, originando la formación de flujos de escombros al interior de los barrancos (Cuanalo y Melgarejo, 2002).

#### **1.4 Justificación**

El cambio de uso de suelo no solo genera la pérdida de biodiversidad sino también favorece la inestabilidad del relieve con el establecimiento de campos agrícolas y áreas urbanas, situación que tiene una relación directa con el aumento de los procesos gravitacionales en sitios con topografía abrupta, litología friable y alta precipitación (Chen y Huang 2013; Kipkosgei-Kilimo 2014; Reichenbach et al. al. 2014). En el caso del Volcán Pico de Orizaba, el cambio de uso de suelo ha ido en aumento principalmente por la nula actividad eruptiva que le da confianza a la población

para habitar en sus laderas, lo cual ocasiona posteriores alteraciones a la vegetación natural por actividades agrícolas, forestales y ganaderas. Sin embargo, estas actividades sumadas a la ubicación geográfica del Volcán que contribuye a la incidencia de altas precipitaciones, favorecen la inestabilidad de laderas al dejar expuestos materiales parentales altamente intemperizados y fracturados, que posteriormente colapsan y se remueven con lluvias excepcionales. Esta situación pone en riesgo a las comunidades que habitan en las laderas del Volcán Pico de Orizaba tal como ocurrió en los eventos de 1920 y 2003. Es por ello que este estudio se generó un modelo para mapear la susceptibilidad a procesos gravitacionales en sitios con diferentes depósitos de origen volcánico y sedimentario que han tenido un cambio de uso de suelo, a fin de determinar zonas de susceptibilidad que necesiten regenerar su vegetación natural. Así, al abordar directamente este problema y difundir los resultados se sugerirá a las autoridades gubernamentales y locales a una mejor planeación, toma de decisiones, manejo y atenuación de la probabilidad de que un nuevo flujo de escombros ponga en riesgo a las comunidades que habitan en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

## **1.5 Hipótesis**

El cambio de uso de suelo contribuye a la formación de procesos gravitacionales por lo que en sitios con vegetación natural su incidencia responde a la diversidad topográfica, edáfica y de vegetación que proporcionan las unidades geomorfológicas geoformas con diferente origen geológico presentes en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

## **1.6 Objetivos**

### Objetivo.

Generar un modelo para determinar la susceptibilidad a procesos gravitacionales en sitios donde ha ocurrido un cambio de uso de suelo al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

### Objetivos Particulares.

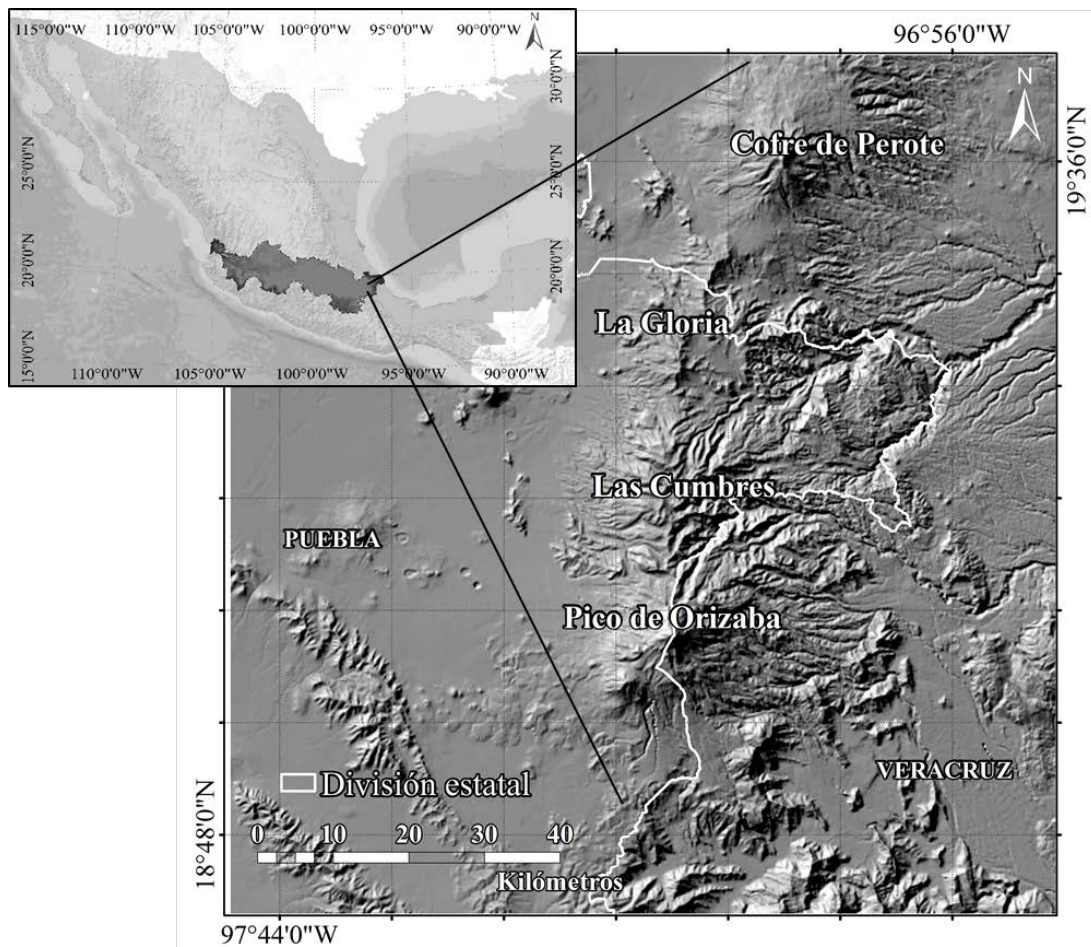
- Generar un mapa de geoformas del relieve volcánico y sedimentario.
- Generar un mapa del inventario de procesos gravitacionales y cuantificar la incidencia de procesos gravitacionales por geoforma.
- Evaluar el cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012.

- Determinar la distribución de variables asociadas al cambio de uso de suelo (accesibilidad a sitios con vegetación natural, fertilidad de suelos y prácticas forestales) e inestabilidad de laderas (relieve y estructura del suelo).
- Generar un mapa de susceptibilidad de procesos gravitacionales por cambio de uso de suelo.

## **2. Metodología**

### **2.1 Área de Estudio**

La subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto se ubica en la ladera sur del Volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), el cual alcanza una altitud de 5675 m s. n. m. en las coordenadas 19.01° N y 97.16° W, dentro de una barrera orográfica, formada por los volcanes Cofre de Perote, La Gloria y Las Cumbres, la cual separa al Altiplano Central de la Planicie Costera del Golfo de México, en el contacto del extremo este del Eje Neovolcánico Transversal con la Sierra Madre Oriental (Robin y Cantagrel, 1982; Macías, 2005; Rodríguez et al., 2006). Abarca parte de los estados de Puebla y Veracruz, y entre las ciudades más cercanas a su cima se encuentran: Ciudad Serdán a 19 km con 43,882 habitantes, Ciudad Mendoza a 27 km con 41,778 pobladores, Nogales a 25 km con 34,681 y Orizaba a 26 km con 120,995 habitantes (INEGI, 2010) (Fig. 6).



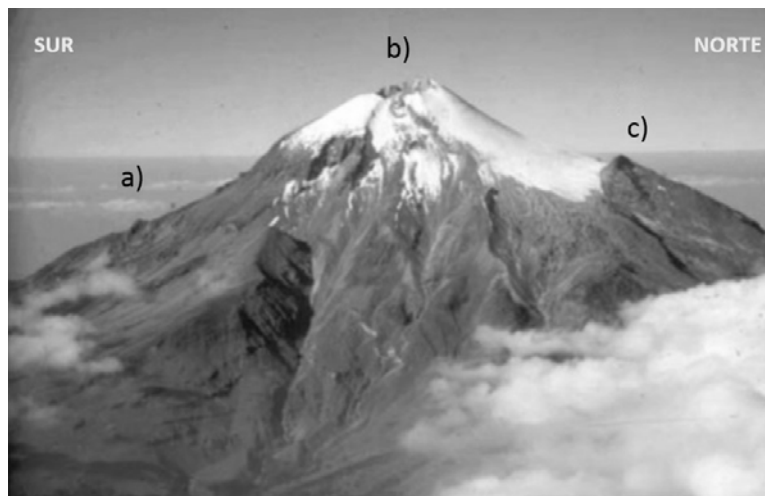
**Figura 6.** Ubicación del Volcán Pico de Orizaba en el Eje Neovolcánico Transversal (Modificado de INEGI, 2006).

La geología del Volcán Pico de Orizaba muestra a un estratovolcán cuaternario dacítico y andesítico cuyo cráter abarca 400m de diámetro y 300m de profundidad, el cual está formado sobre depósitos del Cretácico Medio y Superior (rocas calizas y lutitas), y fallas tectónicas distensivas que han producido un desnivel por lo que el edificio volcánico muestra una altura de 2900 m del lado del Altiplano Central, mientras que desde la Planicie costera alcanza los 4300 m (Robin y Cantagrel, 1982; Höskuldsson y Cantagrel, 1994; Carrasco-Núñez y Rose, 1995; Carrasco-Núñez, 2000; Rossotti, 2005).

La historia eruptiva del Volcán Pico de Orizaba consta de tres fases:

El actual Volcán Pico de Orizaba tuvo una primera fase eruptiva que dio origen a la estructura Torrecillas (al sur del Volcán) y al cono adventicio de Sierra Negra (al oeste del Volcán) que se caracterizó por emitir andesitas porfídicas. La formación del paleovolcán Torrecillas ocurrió hace

0.65±0.71 Ma., en ella destacan lavas andesítico-basálticas con olivino conocidas como Andesita Pilancón, lavas andesítico-dacíticas, lavas más diferenciadas de andesita y andesita con anfíboles que nombraron Jamapa y andesitas con dos piroxenos denominadas como Formación Torrecillas. El volumen que tuvo esta la estructura fue de 240 km<sup>3</sup>, con un cono de 10 km de radio y una altitud de 2300 m que cuando colapso hace aproximadamente 0.25 Ma., dejó un cráter de 3.5 km de diámetro (Fig. 7). Hacia el norte produjo una avalancha que se encauso en el Río Jamapa recorriendo 75 km hacia la costa del Golfo, por lo cual fue nombrada Avalancha Jamapa (Robin y Cantagrel, 1982; Carrasco-Núñez y Gómez-Tuena, 1997; Zimbelman et al., 2004; Macías, 2005; Rossotti, 2005).



**Figura 7.** Formación del Volcán Pico de Orizaba ladera oeste. a) Antiguo cráter del Volcán Torrecillas. b) Actual Pico de Orizaba. c) Restos del Volcán Espolón de Oro (Modificado de Rossotti, 2005).

En la segunda fase se formó la estructura Espolón de Oro que se sitúa al noroeste de Torrecillas (Fig. 2). Su origen ocurrió hace 0.21±0.04 Ma. con la presencia una caldera que derivó en la formación de flujos de lava de andesita cuyo deposito se conoce como Paso de Buey; seguido de un flujo de lava dacítica con anfíboles que se relacionan con flujos de bloques y cenizas en la estructura Espolón de Oro; y una andesita basáltica de olivino que se nombró Carnero. Posteriormente, hacia el suroeste se tiene una secuencia alternada de flujos de ceniza, brechas y lavas andesíticas y dacíticas fisúrales del conducto central que han sido denominadas Andesita Alpinahua y datadas en 0.15±0.9 Ma. Este paleovolcán se estimó que tuvo 50 km<sup>3</sup> de volumen y colapsó hace 16,500 años AP, ocasionando la avalancha Tetelzingo que se transformó en lahar y recorrió 85 km hacia el río Tliapa y después se incorporó al río Seco, para cubrir 143 km<sup>2</sup> (Robin y Cantagrel, 1982; Carrasco-Núñez et al., 1993; Zimbelman et al., 2004; Macías, 2005). Contemporáneamente a la formación del Espolón de Oro, se originaron domos periféricos producto



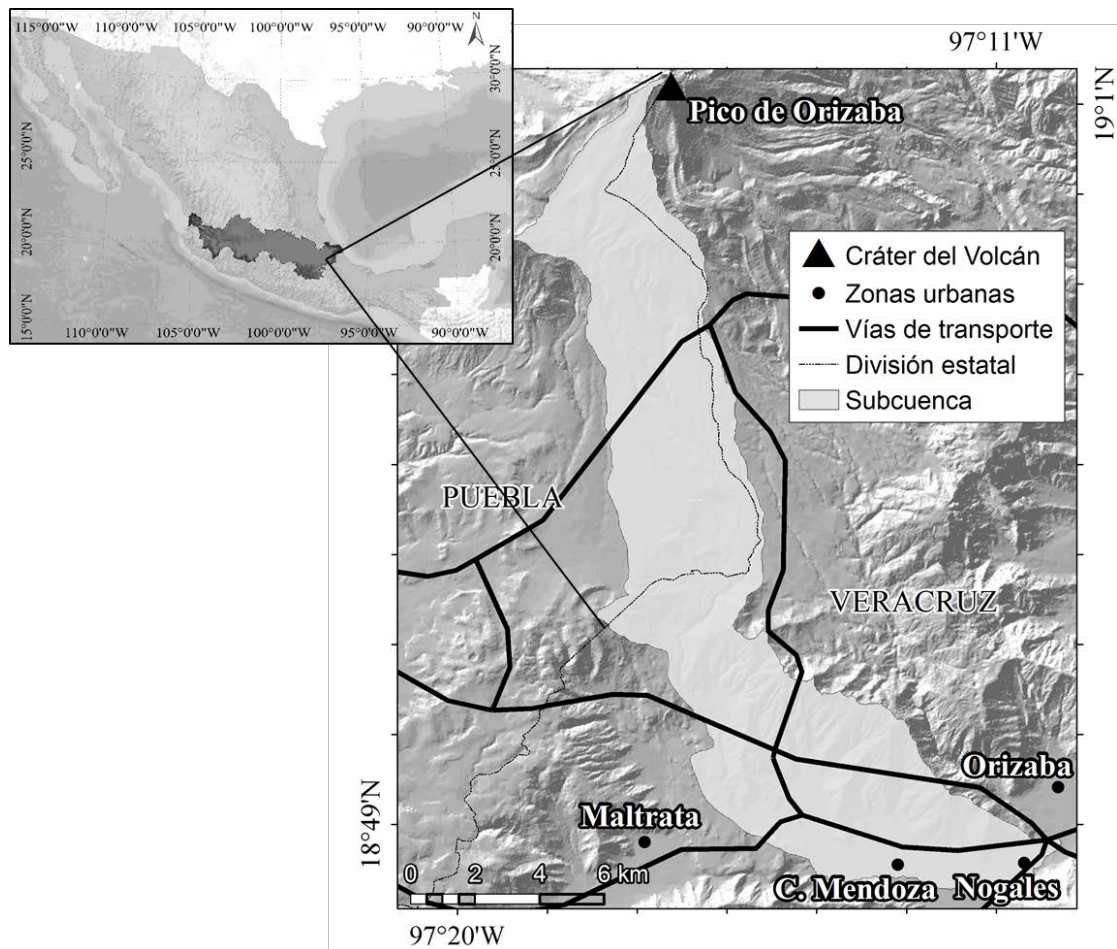
de una intensa actividad explosiva con erupciones plinianas, que generaron la caída de ceniza dacítica y vítrea y la formación de los siguientes domos: Tecomate de lava riolítica de obsidiana (NE); Colorado de lava dacítica y flujos piroclásticos (SW); Sillatepec y Chichihuale ambos dacíticos (NW); y el complejo Chichimeco de lavas andesíticas. Estos eventos se explican como el final de una cámara magmática superficial (Robin y Cantagrel, 1982; Carrasco-Núñez et al., 1993; Macías, 2005).

Finalmente, la tercera fase fue la formación del actual Pico de Orizaba que comenzó con el colapso del Espolón de Oro hace 16,500 años AP, produciendo lavas dacíticas de horblenda que fluyeron 13 km al SE, lavas andesíticas al NE y la generación del actual cono con la presencia de lavas dacíticas de anfíboles y piroxenos al SW y NE del cráter (Fig. 2). Estratigráficamente destacan los depósitos de una erupción de flujos de pómez de 13,000 años al este, de caídas de pómez y flujos piroclásticos de entre 8,500 y 9,000 años y de flujos de pómez y cenizas de 4,100 años al oeste y sureste. Por los diversos depósitos, esta fase se interpreta como una actividad eruptiva con múltiples erupciones de magma básico proveniente de regiones profundas en la corteza terrestre. Hacia el presente han sido reportadas 15 erupciones con actividad fumarólica, emisión de cenizas y flujos de lava desde 1157. Para la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto destacan flujos de lava históricos producidos en 1537, 1545, 1566 y 1613 que se han logrado determinar al norte de la misma. El actual Pico de Orizaba cuenta con 25 km<sup>3</sup> de volumen total y sobre sus depósitos se llevan a cabo actividades de recreación, agrícolas, forestales, industriales y el establecimiento de áreas urbanas (Robin y Cantagrel, 1982; Carrasco-Núñez et al., 1993; Macías, 2005).

### **2.1.1 Características de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto**

La subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto se encuentra al sur del Volcán Pico de Orizaba (Fig. 8), tiene una extensión de 105 km<sup>2</sup>, con un diámetro mayor de 25 km y uno menor de 6 km, posee un gradiente altitudinal de 1280 a 5675 m s. n. m. y está ubicada dentro de la cuenca del Río Papaloapan.

La subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto se localiza al interior la cuenca hidrológica del Río Blanco, que a su vez forma parte de la Región Papaloapan. La cuenca del Río Blanco tiene un área de 3,130 km<sup>2</sup> y principalmente está delimitada por la ladera sur del Volcán Pico de Orizaba y la ladera norte de la Sierra de Zongolica (CONAGUA, 2012).



**Figura 8.** Localización de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto (Modificado de INEGI, 2006).

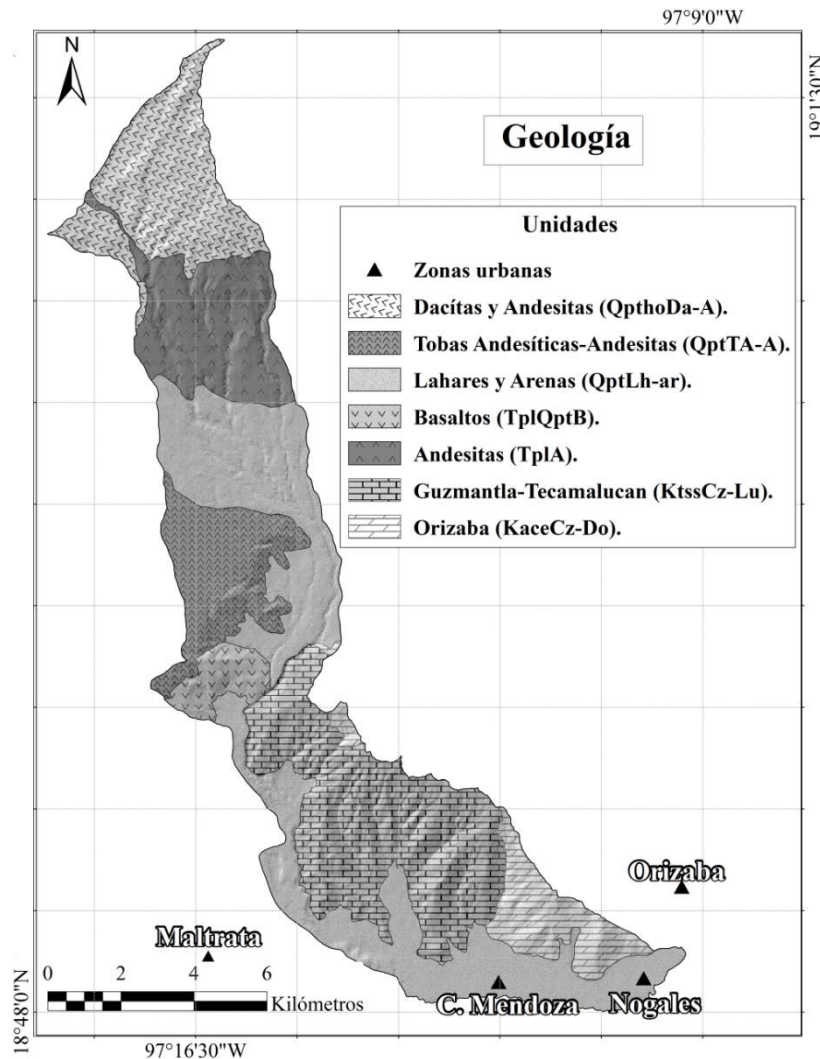
Dentro de esta subcuenca se presenta una red hidrológica con cauces intermitentes, alimentada principalmente en la temporada de lluvias. El cauce principal es el que le da nombre a la subcuenca, descendiendo del noroeste al sureste desde los 3700 m s. n. m. y posteriormente a los 1300m s. n. m. modifica su dirección de oeste a este hasta incorporarse al Río Blanco, recibiendo escurrimientos provenientes de los depósitos sedimentarios cretácicos que componen a los cerros La Ortiga, La Cumbre y Escuela Vieja. Las pendientes en los cauces van de 12 a 50°, con paredes que tienen entre 10 y 20m de altura y con ancho promedio fluctuante a lo largo de la barranca, siendo la región media (4000 a 2500 m s. n. m.) la más abierta con 20 a 25m con respecto a las regiones alta (5675 a 4000 m s. n. m.) y baja con 10 a 15m (2500 a 1000 m s. n. m.) (Rodríguez et al., 2006).

En esta subcuenca destaca en el evento que ocurrió el 5 de junio de 2003 durante la tormenta tropical Ernesto (260 mm de precipitación en ese día), las lluvias intensas ocasionaron el descenso de un flujo de escombros por el cauce del Río Chiquito-Barranca del Muerto. Los daños menos

graves fueron la anegación de lodo (2 m de tirante) en un jardín de niños, obstrucciones en la autopista e inundación de algunas casas (80 cm de tirante). Los daños más importantes se observaron con rupturas de un oleoducto (30"), un gaseoducto (30") y un LPGducto (24"), las cuales ocasionaron una explosión con un perímetro de cientos de metros que causó la pérdida de vidas humanas, afectaciones económicas y contaminación del agua en la comunidad de La Balastrea (El Universal, 2003; CFE, 2006; Rodríguez et al., 2006). Dado lo anterior, resulta interesante analizar los efectos que tiene el cambio de uso de suelo en la inestabilidad de ladera, para así contribuir desde alternativas de aprovechamiento forestal a una solución, que a largo plazo junto con estudios de otras disciplinas minimice la probabilidad de ocurrencia de eventos como el antes descrito.

### **2.1.2 Geología**

El Volcán Pico de Orizaba es un estratovolcán dacítico-andesítico formado sobre rocas calizas y lutitas, situación que resulta evidente en los depósitos geológicos de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto (Fig. 9), mismos que se expresan en siete unidades de la carta Geológico-Minera 1:250,000 (SGM, 2000; SGM, 2001):



**Figura 9.** Mapa geológico de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto. Escala 1:250,00 (SGM, 2001).

- *Formación Orizaba (KaceCz-Do).*

Son calizas café claro y gris claro que al intemperizarse dan tonos gris claro y pardo, están compuestas por materiales arrecifales y subarrecifales, con reemplazamiento de dolomita que ocasiona coloraciones gris oscuro con horizontes pardos a gris claro. Se estima que tiene espesores de 1000 a 1200m y una edad que data del Cretácico Inferior (Albiano-Cenomaniano) a partir de miliolidos y foraminíferos bentónicos (SGM, 2000).

- *Formación Guzmantla-Tecamalucan (KtssCz-Lu).*

Su litología está conformada por la Formación Tecamalucan que corresponde a sedimentos calcáreo-arcillosos, descritos como una alternancia de calizas de color gris oscuro, arcillosas y carbonosas que gradúan a margas arenosas con intercalación de lutitas cafés con areniscas café

rojizo; dicha formación se origina por depósitos calcáreos arrecifales y subarrecifales de estratificación gruesa a masiva en color gris crema pertenecientes a la formación Guzmantla, por ello se le considera una sola unidad. La edad de esta unidad se realizó a partir de fósiles de microfauna que datan del Cretácico Superior, del Coniaciano-Santoniano para la Formación Tecamalucan y del Turoniano Superior para la Formación Guzmantla (SGM, 2000).

- *Andesitas (TplA)*.

Es un depósito del Plioceno Medio nombrado Formación Teziutlán. Son andesitas gris oscuro a negro que al intemperizarse dan coloraciones café claro, poseen estructura compacta y textura afanítica con intenso fracturamiento. Es un depósito con amplia distribución al encontrarse en sitios como los volcanes Cofre de Perote, Pico de Orizaba, Sierra Negra, Malinche y Sierra de Tlaxco (SGM, 2000).

- *Basaltos (TplQptB)*.

Son depósitos de finales del Plioceno y principios del Pleistoceno que forman derrames fisúrales basálticos ocasionados por pequeños conos de eyección asociados al Eje Neovolcánico Transmexicano. Estos basaltos muestran bloques de hasta un metro y sobre él se han encontrado bombas de entre 0.15 y 0.20m de diámetro y bloques de 0.80m de diámetro (SGM, 2000).

- *Lahares y arenas (Qpt Lh-ar)*.

Es una unidad producida por diversas fases de actividad del Volcán Pico de Orizaba, lo que le atribuye un origen dentro del Pleistoceno. Este depósito ha tenido varias clasificaciones que ponen en evidencia su complejidad. Primero INEGI (1984) lo consideró como dos unidades cuaternarias: una de conglomerados constituidos por areniscas retrabajadas (polimícticos-areniscas) y otra por conglomerados polimícticos. Posteriormente, Toriz (1990) los clasifica como depósitos aluviales, y más tarde se dictaminó como una amplia secuencia volcánica-sedimentaria constituida por deleznales depósitos piroclásticos de andesita, areniscas grises, areniscas amarillas, areniscas conglomeráticas y conglomerados con clastos de andesita, algunos clastos de diorita y fragmentos de basaltos y caliza (SGM, 2000).

- *Tobas Andesíticas-Andesitas (QptTA-A)*.

Son arenas volcánicas y cenizas pseudoestratificadas en delgadas láminas de 0.03-0.08 m de espesor, su origen data de mediados del Pleistoceno hasta mediados del Holoceno, se distribuye desde Ciudad Serdán hasta el valle de Tehuacán, y se identifican en campo por tener una coloración de gris claro a gris que al intemperizarse varían a amarillo (SGM, 2000).

- *Dacítas-Andesitas (QpthoDa-A).*

Son principalmente lavas dacíticas combinadas con andesitas que poseen altas concentraciones de sílice, ambas provienen de la actividad efusiva del Volcán Pico de Orizaba a finales del Pleistoceno y principios del Holoceno y se expresan en las estructuras del Pico de Orizaba, Sierra Negra y sus alrededores (Carrasco-Núñez, 1993; Carrasco-Núñez y Rose, 1995).

Dado lo anterior, se puede constatar que la formación de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto y sus alrededores ha pasado por diferentes escenarios geológicos, que van desde el Cretácico Inferior en su etapa arrecifal marina hasta principios del Holoceno en las fases de construcción del Pico de Orizaba y Sierra Negra (Fig. 4). En las partes más bajas de la subcuenca se ubican los depósitos más antiguos de formados por calizas arrecifales y subarrecifales provenientes del Cretácico Inferior (KaceCz-Do) y por sedimentos calcáreo-arcillosos del Cretácico Superior (KtssCz-Lu). En la región media de la subcuenca se pueden observar materiales basálticos originados por pequeños conos de eyección que se asocian al Eje Neovolcanico Transmexicano y datan del Plioceno-Pleistoceno (TplQptB), en esta zona también se encuentran arenas volcánicas y cenizas pseudoestratificadas formadas entre el Pleistoceno y el Holoceno (QptTA-A); y un depósito que se distribuye hacia las partes más bajas de la subcuenca constituido como una mezcla de depósitos volcánicos retrabajados y areniscas, el cual se ha venido formando desde el Pleistoceno (QptLh-ar). Finalmente, en el área más alta de la subcuenca se localizan andesitas con intenso fracturamiento que se originaron durante el Plioceno Medio (TplA) y depósitos con intenso fracturamiento que provienen de la actividad efusiva del Volcán Pico de Orizaba que dio lugar a lavas dacíticas combinadas con andesitas entre el Pleistoceno-Holoceno (QpthoDa-A) (SGM, 2000).

Si bien los depósitos volcánicos del Terciario y los provenientes de la construcción del Volcán Pico de Orizaba en el Cuaternario son predominantes en la parte alta y media de la subcuenca, los depósitos sedimentarios y las fallas tectónicas distensivas también han influido en la distribución de dichos depósitos volcánicos al haberlos dirigido sobre una topografía desnivelada correspondiente a una región bentónica marina que aún se expresa en la parte baja de la subcuenca y que limita la dirección de los flujos de escombros al sureste del Volcán. Por otro lado, el valor económico que representan los depósitos sedimentarios se basa en la extracción de cal hidratada, cemento y bloques de mármol útiles para la industria de la construcción en Orizaba y Córdoba; al igual que los depósitos volcánicos basálticos y laháricos que también contribuyen a esta industria con la explotación de gravas y arenas; mientras que las tobas andesíticas tienen un valor económico hacia

las actividades agrícolas ya que ahí se desarrollan suelos fértiles, situación que ha derivado en el intenso cambio de cobertura vegetal natural a campos agrícolas (SGM, 2000).

### **2.1.3 Edafología**

Las características edafológicas al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranco del Muerto están determinadas por INEGI (2006) en el conjunto edafológico escala 1:250,000, después de que desde 1998 se comenzó con el esfuerzo por digitalizar la serie I en conjunto con INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias); la verificación de campo se realizó en 2004 y se obtuvo el producto final en 2006. Para esta subcuenca no existe información edafológica a escala más detallada, no obstante, los datos vectoriales expresados por INEGI (2006), complementados con descripciones de la Base Referencial del Recurso Suelo de 2007 (Establecida por la Organización para la agricultura y la alimentación de las Naciones Unidas abreviada como WRB por sus siglas en inglés) resultan de utilidad para conocer el panorama general de la subcuenca antes de hacer los muestreos en campo que permitan tener un análisis edáfico más detallado.

A continuación, se muestran ocho tipos de suelo determinados por INEGI para la subcuenca del Río Chiquito-Barranco del Muerto (Fig. 10).

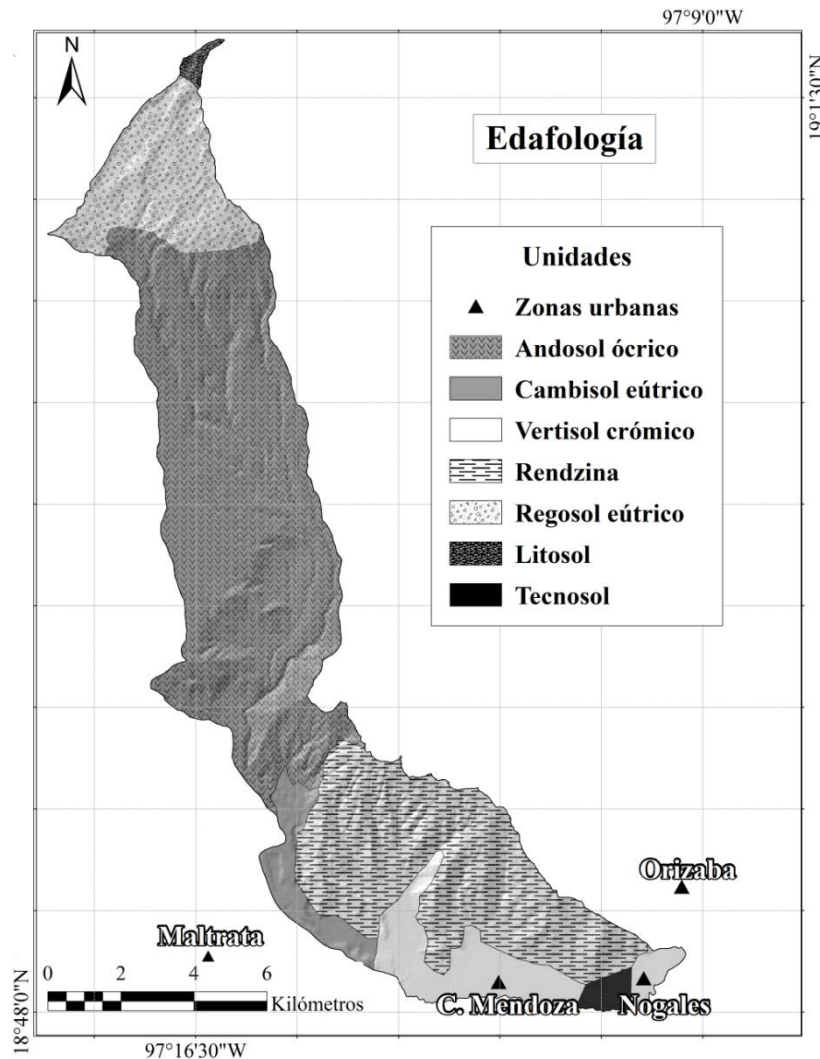


Figura 10. Mapa edafológico de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto, escala 1:250,000 (INEGI, 2006).

- *Andosol ócrico.*

Los andosoles son suelos originados a partir de productos volcánicos o materiales ricos en silicatos, se forman en la mayoría de los ambientes árticos, templados, húmedos o tropicales. Son suelos negros desarrollados principalmente de cenizas o pómez rica en sílice, cuando hay un intemperismo rápido pueden acumular complejos órgano-minerales como el alófono, imogolita y ferrihidrita. Al interior de la subcuenca este suelo se encuentra en la parte media dentro de un rango altitudinal de 1960 a 3920 m s. n. m., tiene una extensión de 51.282 km<sup>2</sup> y se le califica como ócrico, describiendo a un andosol muy limoso o arcilloso de menos de 50 cm de profundidad y con coloraciones claras que dejan de manifiesto la carencia de materia orgánica y por tanto de algunos nutrientes. No obstante, en esta zona es un suelo que se aprovecha para la agricultura debido a que



como cualquier andosol favorece el enraizamiento y el almacenamiento de agua (INEGI, 2006; WRB, 2007).

- *Cambisol eútrico.*

Los cambisoles son suelos que forman por lo menos un horizonte incipientemente diferenciado, se desarrollan al transformar por intemperismo ligero a moderado el material parental, aumentando los porcentajes de arcilla y removiendo carbonatos, lo que se traduce en una estructura consolidada y una coloración parduzca. Son suelos que carecen de iluviación de arcillas, materia orgánica y compuestos de aluminio y hierro, y su formación ocurre comúnmente en zonas templadas con ciclos de erosión y depositación. En la subcuenca se localizan al suroeste entre los 1520 y 2020 m s. n. m., ocupan un área de 4.18 km<sup>2</sup> y posee el calificador eútrico que sugiere una saturación de bases de más del 50% en los primeros 100 cm de la superficie del suelo o en los primeros 20 cm de material cementado, esta característica indica que son suelos fértiles al tener concentraciones altas de cationes como el calcio, magnesio, potasio y hierro. Actualmente, en algunas zonas se utiliza para la agricultura y en otras se han establecido áreas urbanas (INEGI, 2006; WRB, 2007).

- *Vertisol crómico.*

Los vertisoles son suelos con alto contenido de arcillas de esmectitas, derivadas por intemperismo y con propiedades expandibles, se destacan porque durante la época de secas forman grietas anchas y profundas desde la superficie hasta 50 cm abajo, lo que ocasiona que los sedimentos superficiales caigan por esas grietas y se mezclen continuamente con sedimentos internos. Comúnmente se desarrollan sobre depresiones o planicies en climas tropicales. Dentro de la subcuenca se localiza al sur sobre la llanura de inundación entre los 1280 y 1600 m s. n. m. abarcando un área de 8.78 km<sup>2</sup>, se le otorgo el calificador de crómico que se da cuando existe una capa subsuperficial con coloración rojiza-oscura. En esta zona se utiliza para la agricultura principalmente (INEGI, 2006; WRB, 2007).

- *Rendzina.*

Las rendzinas se clasifican como leptosoles desarrollados sobre roca calcárea, cabe mencionar que con las modificaciones a la taxonomía de suelos en mapas más recientes se les conoce como leptosoles réndzicos (WRB, 2007). Se caracterizan por ser suelos muy someros (<50 cm), con una capa superficial oscura y rica en materia orgánica, usualmente son extremadamente pedregosos y no tienen limitación climática. Están ubicados en la región sureste de la subcuenca sobre las montañas de origen marino Guzmantla-Tecamalucan y Orizaba en un rango altitudinal de 1300 a 2660 m s. n. m. con 27.02 km<sup>2</sup>. Estos suelos no tienen un aprovechamiento directo pero las rocas sobre las que

de desarrollas sirven para la industria de la construcción en Orizaba y Córdoba (INEGI, 2006; WRB, 2007).

- *Regosol eútrico.*

Los regosoles contienen a todos los suelos que no pueden clasificarse debido a su complejidad. Coinciden en tener un incipiente desarrollo sobre materiales no consolidados, erosionados y comúnmente de climas áridos. No tienen un horizonte diagnóstico, su textura es variable y similar a la roca madre. Se encuentran en la zona norte de la subcuenca, ocupa 12.23 km<sup>2</sup> en el área donde confluyen las geoformas andesita y andesita basáltica Pilancón, andesita y dacita Alpinahua, andesita Torrecillas, Sierra Negra y una porción de la dacita Orizaba, en una altitud que va de 3920 a 4880 m s. n. m. Posee el calificador de eútrico que indica un suelo rico en nutrientes, sin embargo, la vegetación natural se ve limitada debido a la altitud en que se encuentra (INEGI, 2006; WRB, 2007).

- *Litosol.*

Los litosoles se incluían en el mapa de suelos del mundo (FAO-UNESCO, 1971-1981) pero actualmente se incluyen dentro de los leptosoles en la taxonomía de la WRB, 2007, estos son suelos incipientes que se desarrollan sobre roca madre comúnmente en zonas montañosas, no tienen más de 10 cm de espesor y presentan una alta pedregosidad en superficie. Este suelo se encuentra entre los 4860 y los 5600 m s. n. m., ocupando 0.51 km<sup>2</sup> del extremo norte de la subcuenca sobre los depósitos de la lava histórica de 1613 (INEGI, 2006; WRB, 2007).

- *Tecnosol.*

Los tecnosoles son suelos atribuidos a las actividades humanas, es decir, que no tienen una pedogénesis natural. Si bien se construyen a partir de materiales parentales, su conformación dista de las características que poseían los materiales en la naturaleza. Son depósitos sellados entre los que se encuentran, pavimentos, rellenos de minería y cementos utilizados en áreas urbanas. Dentro de la subcuenca tienen su mayor representación sobre la llanura de inundación, en este mapa se observan entre los 1300 y 1340 m s. n. m. con un área de 1.09 km<sup>2</sup> en el municipio de Nogales, sin embargo, este suelo se distribuye en la parte baja y media de la subcuenca en los asentamientos humanos y como pavimento carretero (INEGI, 2006; WRB, 2007).

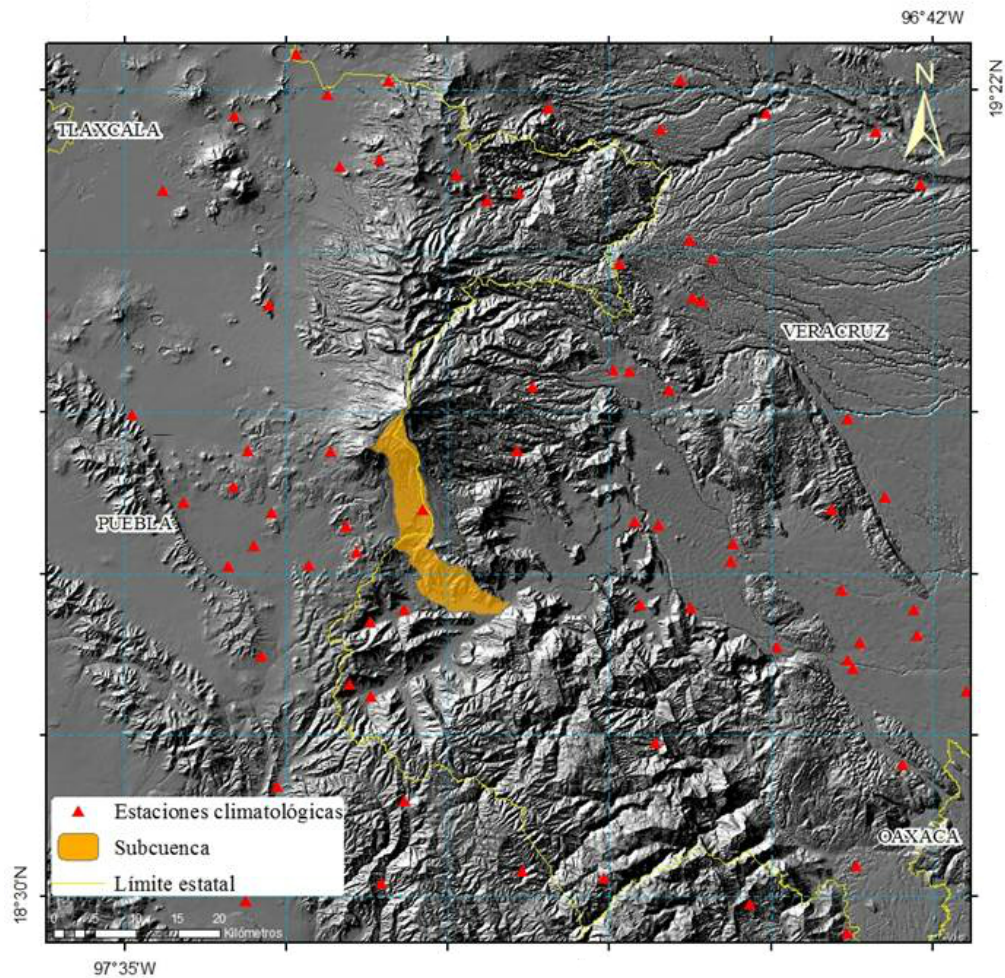
Las características edáficas de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto son bastante diversas, respondiendo sobre todo a la variedad geológica que en ella se encuentran. Por ejemplo, se observan Andosoles producto de la actividad eruptiva del Volcán Pico de Orizaba, Cambisoles que responden a procesos de erosión y depositación en la zona de flujos piroclásticos indiferenciados, Rendzinas derivadas de rocas calcáreas procedentes de las montañas Cretácicas Guzmantla-

Tecamalucan y Orizaba, Vertisoles comunes en áreas de poca pendiente en este caso en la llanura de inundación, Litosoles y Regosoles en material parental y Tecnosoles que no responden a ningún orden natural. No es casualidad la presencia de extensas áreas agrícolas dentro de la subcuenca, ya que los depósitos derivados de productos volcánicos aportan nutrientes al suelo, lo cual aunado a pendientes suavizadas ( $< 6^\circ$ ) garantiza una producción agrícola considerable que conduce a la apropiación de más terrenos que limitan aún más a la vegetación natural, situación que no ocurre en los depósitos sedimentarios donde a pesar de establecer nuevos campos agrícolas, estos están condenados al abandono debido a las fuertes pendientes pero sobre todo a la poca fertilidad del suelo.

#### **2.1.4 Régimen climático**

De acuerdo al Servicio Meteorológico Nacional (2013), en nuestro país se distribuyen 5000 estaciones pertenecientes a la red climatológica nacional; en ella se encuentran datos históricos y actuales de temperatura y precipitación, los cuales se resumen en 3758 estaciones meteorológicas denominadas normales climatológicas (SMN, 2013).

Dichas estaciones no tienen una distribución homogénea, por lo que al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca de Muerto solo se encuentra la estación Paso de Carretas, actualmente suspendida. Dado lo anterior, es necesario analizar los datos climáticos de estaciones cercanas para obtener un régimen climático completo de la subcuenca y sus alrededores. Siendo así, en un radio de 50 km de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto, se ubican 69 estaciones climatológicas (29 en operación y 40 suspendidas), de las cuales 29 se encuentran en el estado de Puebla y 40 en el estado de Veracruz (Fig. 11).

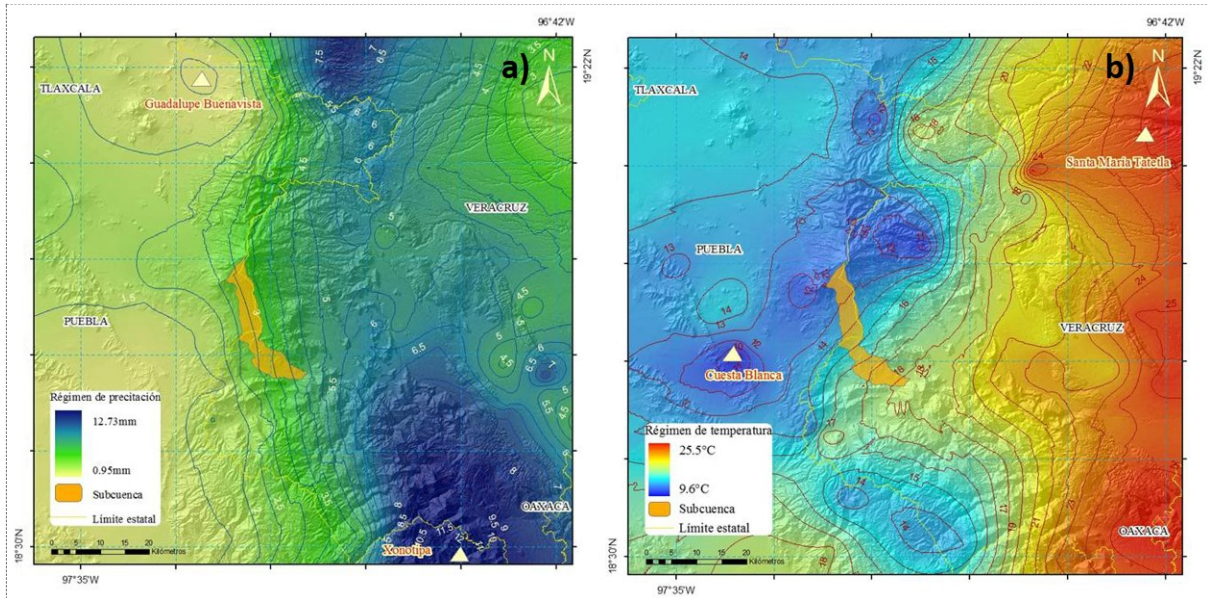


**Figura 11.** Distribución de las estaciones climatológicas alrededor de la subcuenca.

En el análisis de las 69 estaciones climatológicas, se encontraron datos históricos de precipitación y temperatura entre los años 1971 a 2000. Al hacer una interpolación de estos datos promedio diarios se observa que frecuentemente los sitios con mayor precipitación, son los que se encuentran en altitudes menores a los 1800 m s. n. m. y se distribuyen al este de la subcuenca en dirección al Golfo de México. El registro promedio diario más bajo es de 0.95 mm en la localidad de Guadalupe Buenavista (2360 m s. n. m.) al noroeste del mapa mientras el más alto con 12.73 mm se ubica en la región sureste del mapa en la localidad de Xonotipa (1060 m s. n. m.). Para la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto, podemos esperar que en el sector oeste lluevan 2.5 mm al día y hacia el este las precipitaciones aumenten hasta 4.5 mm al día (Fig. 12a).

Asimismo, la interpolación a partir de datos históricos de 1971 a 2000 muestra que el régimen de temperatura presenta valores más altos conforme se avanza a las zonas costeras, por lo que el

registro más alto es de 25.5°C situado al noreste del mapa en la localidad de Santa María Tatetla (282 m s. n. m.), en tanto que el registro más bajo con 9.6°C se presenta al este del mapa en la localidad de Cuesta blanca (2384 m s. n. m.). Al interior de la subcuenca las temperaturas aumentan conforme se pierde altitud y se desplaza al este, con registros de 12 a 18°C (Fig. 12b).



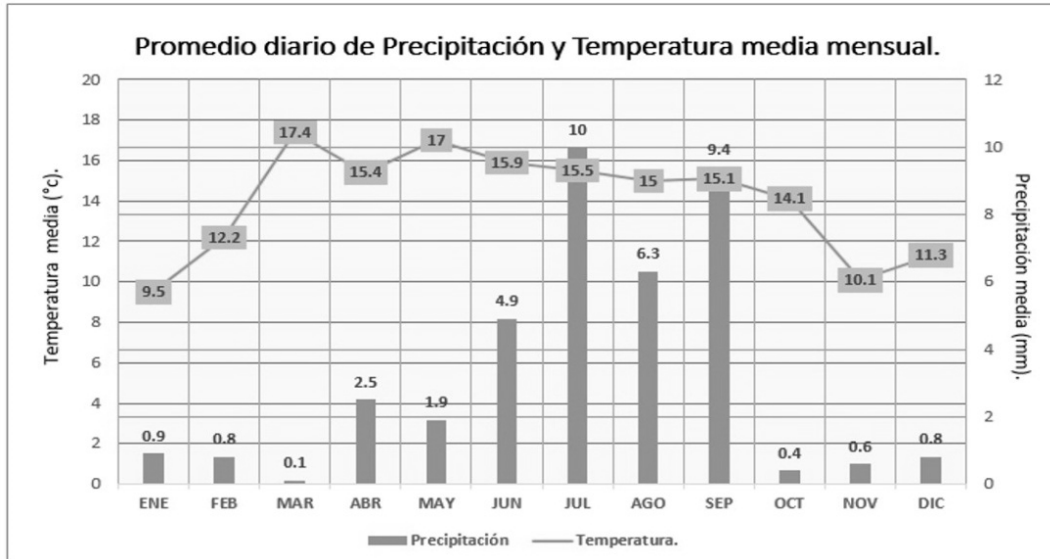
**Figura 12.** Datos promedio diarios para la distribución de precipitación y temperatura en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto. a) Precipitación. b) Temperatura.

En términos generales, los regímenes de precipitación y temperatura muestran un decremento de sus valores en una orientación oeste-este, es decir, que conforme pierde altitud hacia el litoral los valores en los registros de temperatura y precipitación tienden a aumentar. No obstante, es necesario tomar en cuenta los datos de las estaciones Paso de Carretas y Maltrata DGE, esta última por estar cercana a la subcuenca y en condiciones de altitud similares a la comunidad de La Balastreira (1400 m s. n. m.).

- *Paso de Carretas.*

Esta estación se encuentra a los 2887 m s. n. m. en la localidad de Paso de Carretas, en el municipio de Atzitzintla, Puebla. Esta estación estuvo activa solo dos años de 1978 a 1980, registrando temperaturas promedio mínimas de 5.5 a 6.2°C y máximas de 16.2 a 22.7°C, con una ligera tendencia al incremento en sus últimos registros en mayo de 1980. Los datos de precipitación que logró medir son de 0 mm en algunos días de marzo y octubre y el registro máximo de 43.5 mm el 5 de julio de 1979. La tendencia de acuerdo a los datos promedio diario por mes, indican que el mes más caluroso es marzo con 17.4°C promedio mientras que el mes más frío es enero con 9.5°C

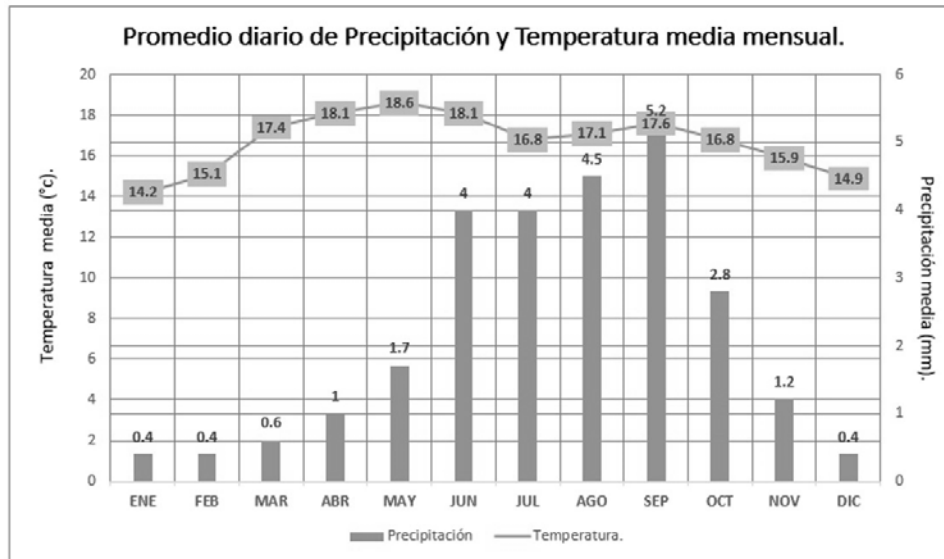
promedio; en tanto que los meses de mayor precipitación son de junio a septiembre, la temporada de lluvias alcanza su máximo registro en julio con 10 mm promedio (Fig. 13).



**Figura 13.** Temperatura y precipitación promedio mensual en la estación Paso de Carretas (Modificado del SMN, 2013).

- *Maltrata DGE.*

Por otro lado, la estación Maltrata DGE se encuentra a 1713 m s. n. m. en el municipio de Maltrata, Veracruz. Esta estación ha estado activa desde 1969 a la fecha, ha registrado temperaturas promedio mínimas de 7.5 a 19.6°C y máximas de 21 a 27.5°C, sin una tendencia geográfica aparente. Los valores de precipitación que ha medido son de 0 mm en marzo, abril y noviembre. El registro máximo de lluvia ocurrió en 1998 y fue de 13.6 mm. Al observar los datos promedio diarios al mes, se puede definir que el mes más caluroso es mayo con 18.6°C promedio mientras que el mes más frío es enero con 14.2°C promedio; en el caso de la precipitación, los meses con más lluvia son de junio a octubre con el registro máximo de 5.2 mm promedio en el mes de septiembre (Fig. 14).



**Figura 14.** Temperatura y precipitación promedio mensual en la estación Maltrata DGE (Modificado del SMN, 2013).

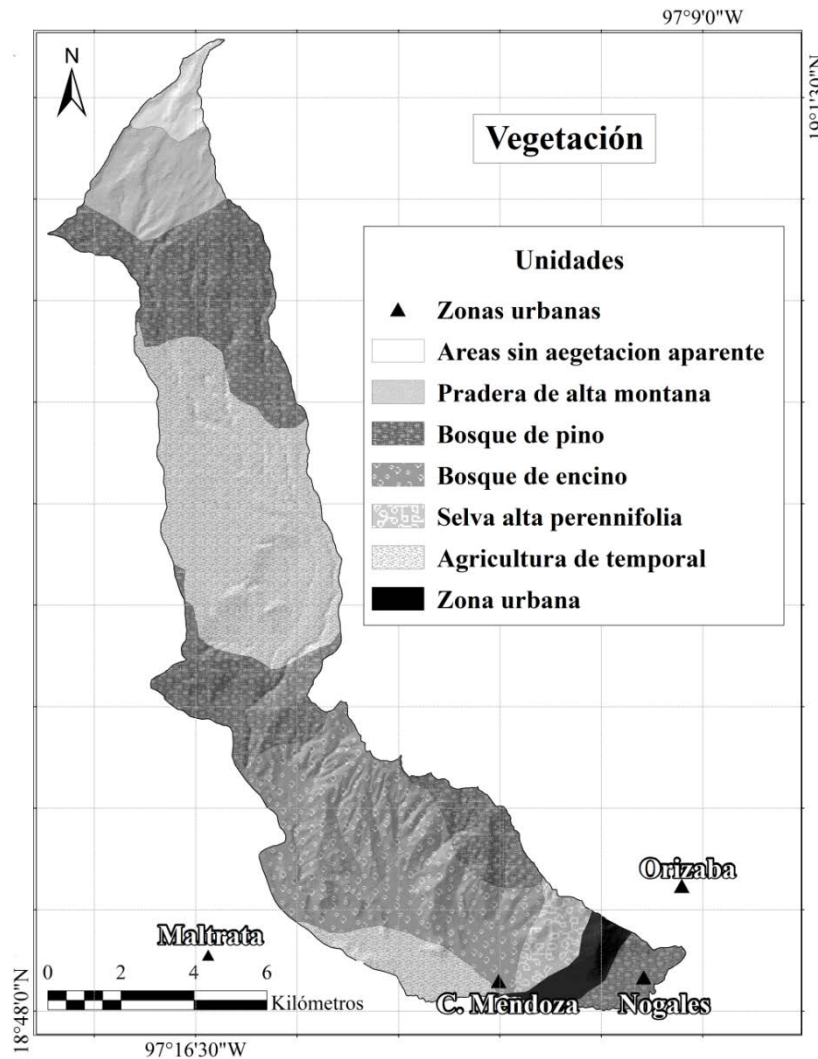
La subcuenca del Río Chiquito-Barranca de Muerto posee una orientación paralela a la línea costera del Golfo de México, situación que sumada al gradiente altitudinal influye en los patrones de temperatura y precipitación, ya que conforme se pierda altitud y se avanza al extremo este de la subcuenca podemos esperar valores más altos en los registros de temperatura y precipitación. No obstante, estos valores siguen una tendencia temporal por lo que tendremos como mes más frío a enero, en tanto que el más cálido será marzo en la parte alta de la subcuenca y mayo en la parte baja; mientras que la temporada de lluvias ocurre entre los meses de junio a septiembre en la región alta de la subcuenca y se extenderá un mes más en la baja.

### 2.1.5 Vegetación

La vegetación de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto ha sido clasificada dentro de mapas de vegetación a nivel nacional por INEGI, que en 1978 inicio con fotointerpretación y trabajo de campo para la elaboración de la Carta de Uso del Suelo y Vegetación a escala 1:250,000 (Serie I) que se publicó 10 años más tarde (INEGI, 2014). Posteriormente se le dio una actualización que comenzó en 1996 (Serie II) utilizando imágenes Landsat de 1993 y trabajo de campo entre los años 1996 y 1999. Finalmente, en 2005 (Serie III) después de tres años de trabajo en campo y análisis de imágenes Landsat ETM 2002, se construyó la base digital que actualmente permite la descarga de los datos de vegetación en sistemas de información geográfica continuando con la escala 1:250000. INEGI generó un insumo básico en la cartografía de uso de suelo y vegetación, el cual ha sido utilizado por otras instituciones que han enriquecido este cartografía con el aporte de datos más elaborados como el Inventario Nacional Forestal y la agrupación que

CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) hizo en 1998, pasando de 244 clases propuestas por INEGI a 54. Si bien la escala de la agrupación de CONABIO es de 1:1 000000, en la región de la subcuenca Río Chiquito-Barranca del Muerto muestra información más detallada en cuanto a los tipos de vegetación y la ubicación de los mismos respecto a la Serie III de INEGI (INEGI, 2014).

Siendo así, para conocer la vegetación al interior de la subcuenca se recurre a la agrupación de CONABIO que brinda un panorama general de los tipos de vegetación y uso de suelo en la subcuenca. A continuación, se muestran la distribución de los tipos de vegetación dentro de la subcuenca de acuerdo a la agrupación de CONABIO (Fig. 15).



**Figura 15.** Vegetación y uso de suelo en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto (Agrupación CONABIO, 1998).



En la cartografía anterior, se presentan cuatro tipos de vegetación y tres usos de suelo al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto, en seguida se describe cada clase nombrada por la agrupación de CONABIO tomando en cuenta su homólogo en el caso de tipos de vegetación según la clasificación de Rzedowski (2006):

- *Áreas sin vegetación aparente.*

Representa zonas que no poseen cubierta vegetal, por lo regular son zonas con características geológicas, edáficas o climáticas que imposibilitan el establecimiento de comunidades florísticas, por lo que solo se pueden establecer líquenes o algunas plantas vasculares con forma de vida rastrera y alta tolerancia a ambientes extremos (*Arenaria bryoides*). Esta área ocupa 2.36 km<sup>2</sup> y se observa en el extremo norte de la subcuenca sobre los depósitos de las lavas históricas del Pico de Orizaba entre los 4380 y 5675 m s. n. m.

- *Pradera de Alta Montaña (Pastizal).*

Es un tipo de pastizal desarrollado en zonas semiáridas y áridas a grandes altitudes. Esta vegetación se caracteriza por el dominio de gramíneas tolerantes al estrés hídrico y bajas temperaturas como *Festuca tolucensis*, en estas comunidades también conviven algunas compuestas como *Senecio salignus* y leguminosas como *Lupinus sp.*, esta última común en altitudes superiores a los 3500 m s. n. m. y pionera en ambientes volcánicos al contribuir con la fijación de nitrógeno. Se encuentra al norte de la subcuenca sobre depósitos de la Andesita Torrecillas y la Andesita-dacita Alpinahua, con una extensión de 7.16 km<sup>2</sup> entre los 3800 y los 4380 m s. n. m.

- *Bosque de Pino (Bosque de coníferas).*

Se trata de una comunidad arbórea que se establecen en regiones con clima templado a semifrío, es un tipo de vegetación característico de zonas montañosas. En él se establecen coníferas características de grandes altitudes como *Pinus patula* y *Abies religiosa*, las cuales se ocupan para la construcción de casas y muebles. Esta vegetación tiene una extensión de 31.35 km<sup>2</sup>, divididos en cuatro sectores que van de la parte alta de la subcuenca sobre los depósitos de andesitas-dacitas Pilancón y los flujos de lava andesítica (2280-3800 m s. n. m.); la parte media de la subcuenca sobre depósitos de Basaltos y una fracción las montañas Guzmantla-Tacamaluca (2240-2700 m s. n. m.); en la parte baja de la subcuenca sobre la cima de las montañas Orizaba (1700-2460 m s. n. m.); y en el extremo sureste de la llanura de inundación (1280-1440 m s. n. m.).

- *Bosque de Encino (Bosque de Quercus).*

Es una comunidad arbórea de distribución generalmente templada y en altitudes medias a bajas. A diferencia de los bosques de Pino, en esta vegetación se presenta una mayor riqueza florística en todos los estratos, por lo que es común encontrar especies de los géneros *Pinus*, *Salix*, *Buddleia*, *Prunus*, *Arbutus*, *Senecio*, *Baccharis* y *Eupatorium*. Esta vegetación ocupa un área de 26.36 km<sup>2</sup> sobre depósitos piroclásticos indiferenciados y de origen marino de las montañas Guzmantla-Tecamaluca y Orizaba entre los 1400 y 2660 m s. n. m.

- *Selva Alta Perennifolia (Bosque tropical perennifolio).*

Se caracteriza porque su vegetación no suelta las hojas en la temporada de estiaje, se establece en climas cálidos y húmedos, y en ella se observan tres estratos en la estructura vertical de la vegetación. El estrato predominante es el de árboles de 30 a 60 m donde destacan *Heliocarpus sp.*, *Brosimum sp.*, *Lysiloma sp.* y *Terminalia sp.*, seguido de árboles como *Cedrela sp.*, *Pithecellobium sp.* y *Parmentiera sp.* en el estrato de 5 a 20 m y un estrato menor a 5 m con ejemplares de *Acacia sp.*, *Blepharidium sp.* y *Trophis sp.* Se ubica al sureste de la subcuenca sobre la formación montañas Orizaba (1380 a 1800 m s. n. m.) en un área de 3.02 km<sup>2</sup>.

- *Agricultura de temporal.*

Es un área que se ha destinado para la siembra y cosecha de alimentos principalmente de consumo humano y para forraje. Se dice que es de temporal porque solo son regados con agua proveniente de la lluvia. Esta actividad ocupa 27.8 km<sup>2</sup> y se distribuye en prácticamente toda la subcuenca, intensificándose en los depósitos de origen volcánico entre 2450 y 3480 m s. n. m.

- *Área Urbana.*

Se trata de un área consignada para el establecimiento de asentamientos humanos, en la agrupación de CONABIO se limita a un área de 2.81 km<sup>2</sup> que ocupa parte de la formación sedimentaria de Orizaba y de la llanura de inundación, no obstante, en la actualidad las zonas urbanas abarca más del 50% de la llanura de inundación y se distribuyen en asentamientos que no sobrepasan los 3200 m s. n. m.

La subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto presenta un gradiente altitudinal (5675-1280 m s. n. m.) que aunado a su posición paralela al Golfo de México, favorece la presencia de diferentes tipos de vegetación. En ella se pueden encontrar pastizales de alta montaña, bosques de pino, bosque de encino y selvas altas perennifolias. Dado lo anterior, se podría esperar una alta riqueza y diversidad florística al interior de la subcuenca, sin embargo, las actividades humanas han mermado su distribución sobre todo en los depósitos volcánicos de la zona media donde la presencia de

campos agrícolas ha confinado a la vegetación natural solo a los barrancos, e incluso en esos limitados espacios se practica la tala ilegal, con lo cual se coarta aún más su distribución. Lo anterior, sumado al crecimiento de las áreas urbanas sugiere que a largo plazo aumentar la demanda de recursos no solo para la industria de la construcción sino para la alimenticia, lo cual podría conducir a una desertificación de los suelos por intensificar aún más las prácticas agrícolas.

### 2.1.6 Uso de suelo

La subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto se conforma por siete municipios que han adquirido ese estatus entre los años 1927 y 1971 (EMDM, 1999), Chalchicomula de Sesma y Atzitzintla se encuentran en Puebla; mientras que C. Mendoza, La Perla, Maltrata, Mariano Escobedo y Nogales se encuentran en Veracruz (Fig. 16).

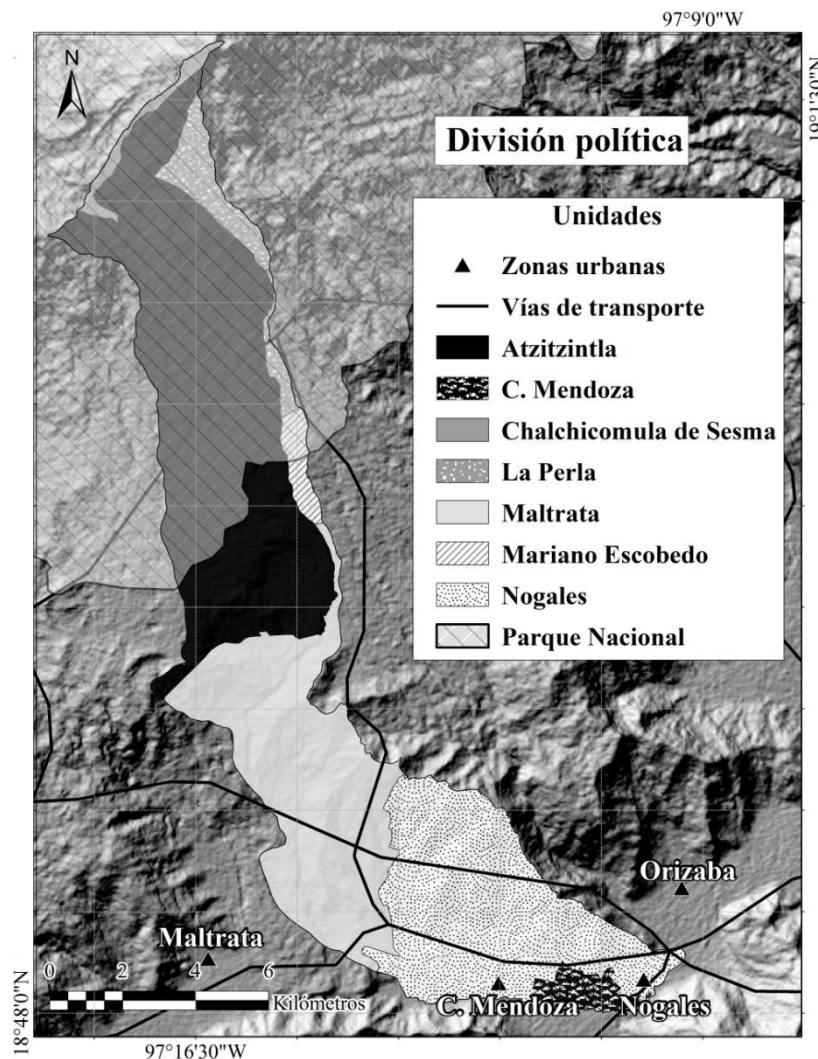
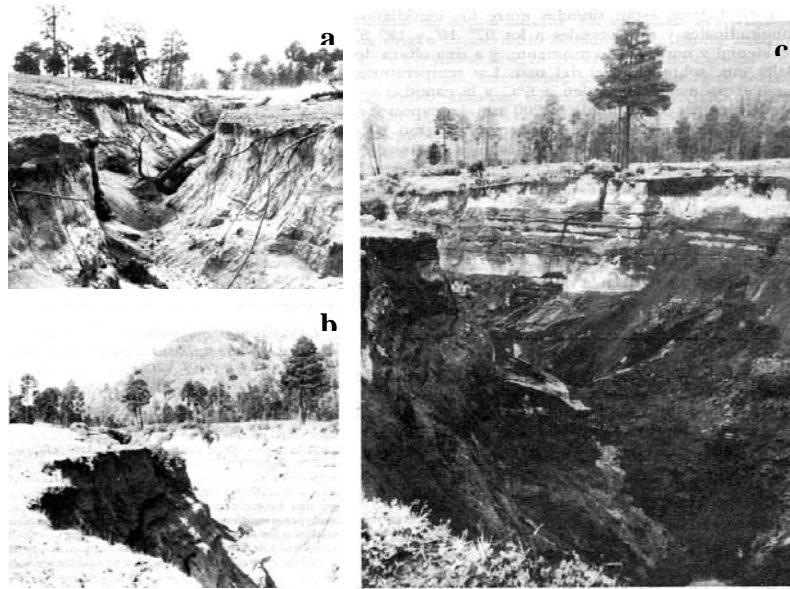


Figura 16. Mapa de municipios en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

El manejo de los recursos naturales en esta región data del Período Preclásico Medio (1000-600 a.C.), con establecimientos de poblaciones Nahuas en áreas de los actuales municipios de Chalchicomula, Atzitzintla y Maltrata. No obstante, fue después de la Conquista que se intensificó el cambio de cubiertas vegetales para producción de productos agrícolas, un ejemplo fue la transformación de matorrales en campos de caña utilizada en el primer ingenio azucarero de América, su construcción fue en 1542 ordenada por el Virrey Antonio de Mendoza en lo que hoy es el municipio de Nogales; siglos más tarde el ingenio siguió en funcionamiento y el paisaje de la llanura de inundación se había transformado en área agrícola (EMDM, 1999).

Posteriormente, en 1937 el Presidente Lázaro Cárdenas decretó conservar las áreas de montañas culminantes a fin de evitar la erosión y alterar el régimen hídrico de las cuencas hidrográficas, con ello se declara al Volcán Pico de Orizaba Parque Nacional destinado a la conservación perpetua de su flora y fauna, sin embargo, fue hasta el 2003 que la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas inició un manejo forestal (Villegas et al., 2011). Dado lo anterior, los sectores de la subcuenca que se decretaron como área protegida se encuentran entre 2840 y 5675 m s. n. m. y corresponden a los municipios de Chalchicomula de Sesma, La Perla y los extremos norte de los municipios de Atzitzintla y Mariano Escobedo (Fig. 12). No obstante, debido a los programas agrícolas promovidos por el gobierno del presidente Luis Echeverría Álvarez, en 1974 fueron removidas cientos de hectáreas de bosques del Volcán para generar áreas de cultivo de papa y avena que abastecieran el mercado interno y externo, dichas prácticas se apropiaron de terrenos del área protegida llegando a altitudes de 4000 m s. n. m. (EMDM, 1999).

Estos campos agrícolas no solo limitaron a la vegetación natural a los barrancos y áreas de suelos poco fértiles para la agricultura (Rendzinas), también han generado procesos de erosión que desencadenan eventos de remoción en masa. Tal como ocurrió en la comunidad de Miguel Hidalgo y Costilla en Tlachichuca (Puebla) al noroeste del Volcán; cuando llegó la temporada de lluvias posterior a la ejecución del programa gubernamental para la transformación de bosque a campo agrícola en 1974. Al no existir una cubierta vegetal que protegiera los depósitos de arena con grava del impacto de las gotas de lluvia y las escorrentías superficiales, en ese año se formó una zanja de 3 a 5 m de ancho, con una profundidad de 4 a 10 m y una longitud de 350 m; al año siguiente la profundidad había alcanzado en las zonas más socavadas los 25m. Para 1978 las dimensiones que presentaba ya eran las de una barranca con 1.7 km de largo y 30-40 m de profundidad y en 1982 ya contaba con hasta 80 m de profundidad (Werner, 1996) (Fig. 17).



**Figura 17.** Formación de una barranca por tala extensiva en 1974. a) 1974. b) 1975. c) 1982. (Tomadas de Werner, 1996).

Eventos como el anterior ocurren en menor escala en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto, donde se observa la presencia de surcos en las orillas cercanas a los barrancos y vías de comunicación, las cuales se asocian con movimiento de escombros en su interior, esto sumado a la existencia de prácticas como la tala ilegal y el pastoreo extensivo ocasionan más disturbios en las restringidas áreas de vegetación natural. Actualmente, cada municipio tiene destinado un determinado número de kilómetros cuadrados para uso común, zona parcelada y asentamiento humano. A excepción del municipio de La Perla que ya cumple con el decreto de conservación, en el resto de los municipios el aprovechamiento agrícola (zona parcelada) es la prioridad, situación que se refleja al interior de la subcuenca con la presencia de extensos campos agrícolas sobre depósitos volcánicos que alcanzan hasta 3640 m s. n. m. en áreas destinadas a la conservación (Tabla 2).

**Tabla 2.** Reparto de tierras de los municipios al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto (INEGI, 2006).

Municipio	Área común (km <sup>2</sup> )	Zona parcelada (km <sup>2</sup> )	Asentamiento humano (km <sup>2</sup> )	Total (km <sup>2</sup> )
Atzitzintla	20.14	16.02	0.63	36.81
C. Mendoza	5.43	0.80	0.093	6.33
Chalchicomula de Sesma	48.10	209.66	4.78	262.54
La Perla	-	1.78	-	1.78
Maltrata	23.61	18.07	0.37	42.04
Mariano Escobedo	1.543	4.48	0.38	6.41
Nogales	11.19	19.00	1.25	31.44

Cada municipio de la subcuenca está dividido por áreas geoestadísticas básicas (AGEB's), donde además de la agricultura, también se observan prácticas forestales y pecuarias. Los municipios que ejercen estas tres actividades dentro de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto son Atzitzintla (10 AGEB's), Mariano Escobedo (2 AGEB's), Maltrata (14 AGEB's), Nogales (4 AGEB's) y C. Mendoza (1 AGEB). En el Censo Agropecuario de las 31 AGEB's que conforman la subcuenca (INEGI, 2007), se indica que las principales actividades agrícolas son el cultivo de maíz, papa, otras leguminosas (habas y chícharo), otras hortalizas (col y zanahoria), calabaza, aguacate y frijol, estos cultivos representan el 94.2% de las actividades agrícolas. En el otro 5.8% destacan los cultivos de avena forrajera, tomate rojo, frutas y nueces, tomate verde y chile (Fig.18).

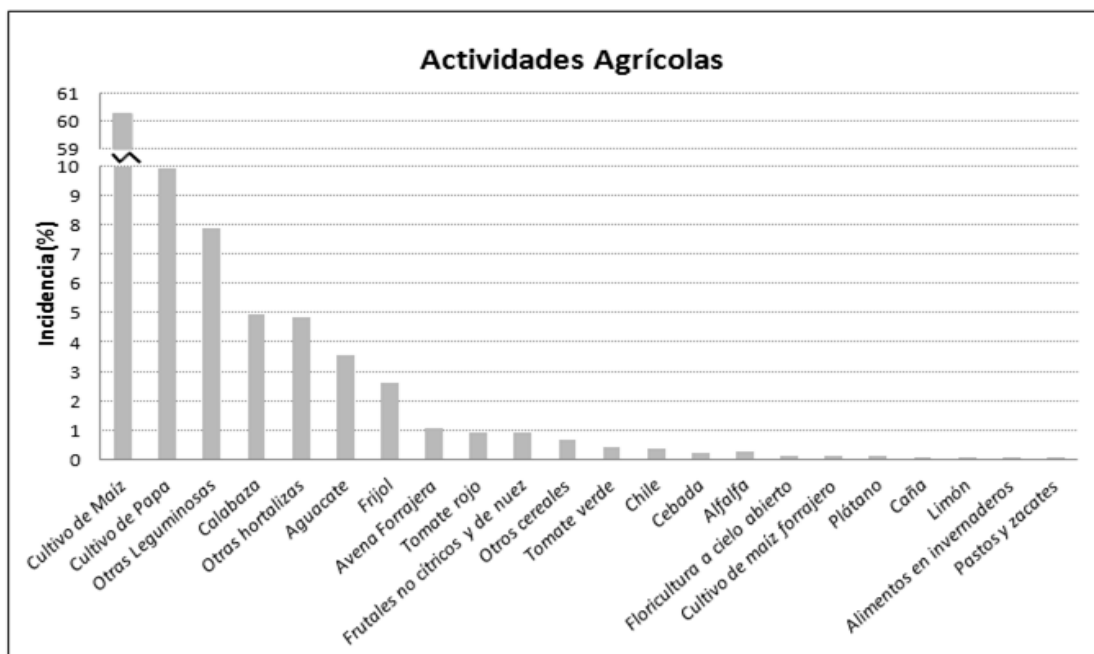


Figura 18. Actividades agrícolas en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca de Muerto (INEGI, 2007).

En las actividades pecuarias que se realizan en la subcuenca (INEGI, 2007), la crianza de caballos es la que domina con el 49.3%, los porcinos de traspatio constituyen el 23% y la cría de borregos se da en el 21.4% del total de las actividades. El resto de las prácticas pecuarias representan 6.3% y en ellas se incluyen la cría de cabras, vacas lecheras, toros, otros animales como gallos y aves de ornato, cerdos de granja y bovinos para consumo (Fig. 19).

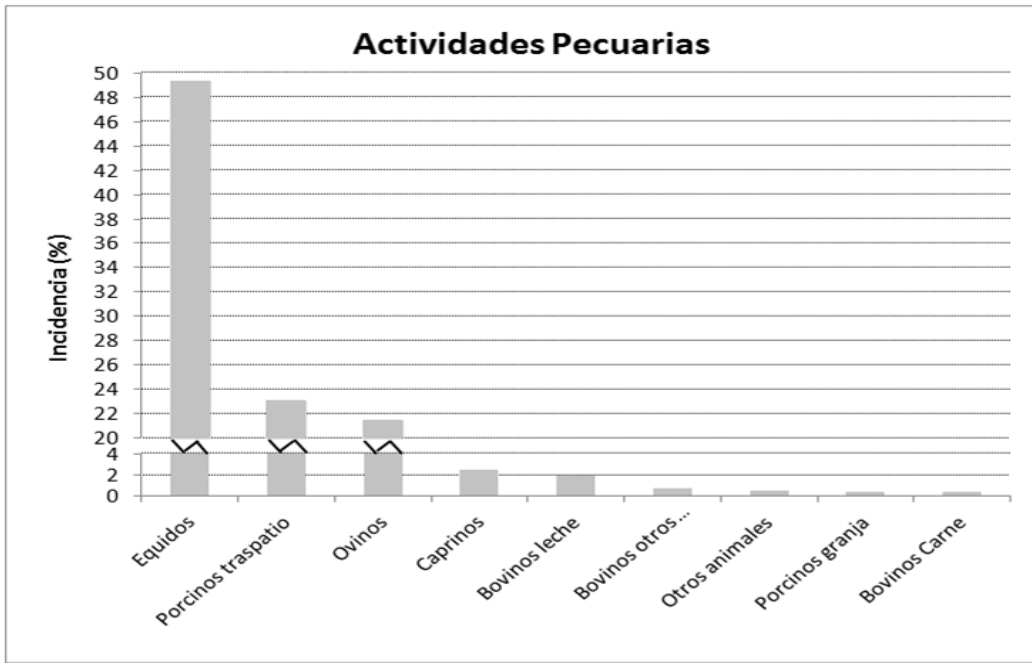


Figura 19. Actividades pecuarias en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca de Muerto (INEGI, 2007).

La tala de árboles es la principal practica forestal que domina en la subcuenca (INEGI, 2007) con el 65.47%. La práctica que le sigue es la agroforestería que combina campos agrícolas en zonas forestales y aprovechan ambos recursos en la misma intensidad con un 25%. Finalmente, menos del 9.52% de las actividades en la subcuenca se dedican a la recolección de resinas, hongos, fibras, semillas, leñas, plantas ornamentales y medicinales (Fig. 20).

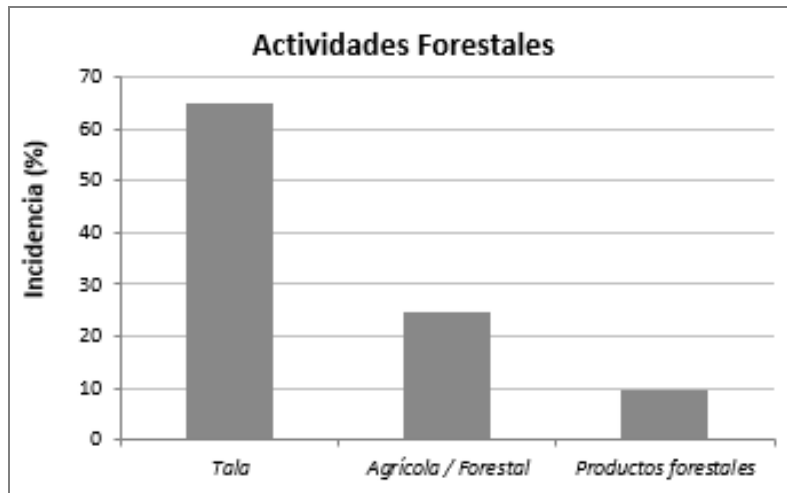


Figura 20. Actividades forestales en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca de Muerto (INEGI, 2007).

Para las actividades agrícolas es necesario mencionar que el censo Agropecuario (INEGI, 2007) solo se reportan la incidencia de cultivos como el número de personas que se dedican a la actividad agrícola y no al área que ocupan los cultivos; es decir, que solo tenemos datos de frecuencia de parcelas por cultivo. Aclarado lo anterior, Maltrata es el municipio que posee más variedad en sus cultivos, destacan por su incidencia respecto a los otros municipios los de maíz (389 parcelas), hortalizas (40 parcelas), aguacate (24 parcelas) y frijol (22 parcelas). Atzitzintla es el municipio que más cultiva papa (102 parcelas) y leguminosas (66 parcelas). En Nogales es donde más se cultiva calabaza (38 parcelas). Mariano Escobedo y C. Mendoza tienen cultivos, pero estos no sobrepasan las 70 parcelas de todos ellos (Fig. 21).

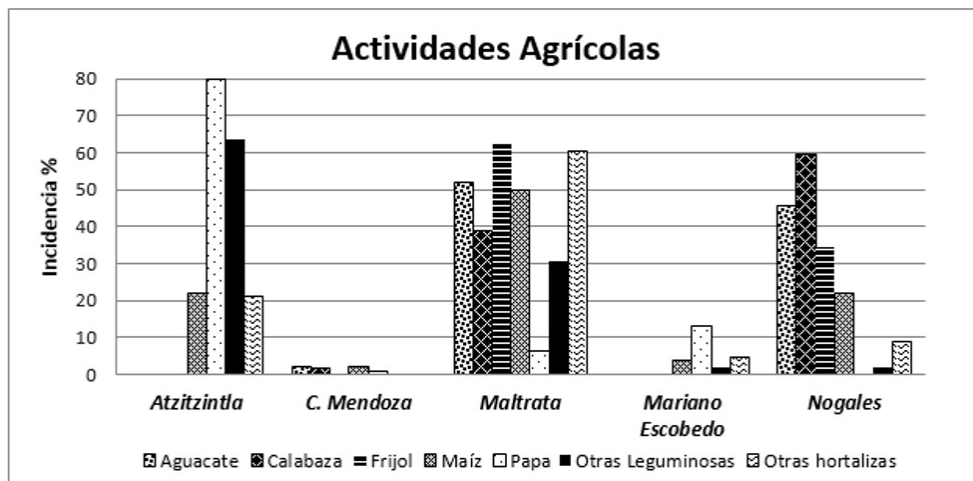


Figura 21. Actividades agrícolas por municipio (INEGI, 2007).

Por tanto, dentro la subcuenca los municipios de Atzitzintla, Maltrata y Nogales se distinguen por tener una alta incidencia de prácticas agrícolas y pecuarias, mientras que los cultivos más comunes en estos municipios son los de maíz, papa, haba, calabaza, aguacate y frijol.

Del mismo modo que en las actividades agrícolas, el censo Agropecuario (INEGI, 2007) reporta a las actividades pecuarias en función de las personas que se dedican a la actividad y tienen un lugar dentro de su propiedad que está destinado a la cría de caballos, cerdos y borregos. Dado lo anterior, las actividades pecuarias más comunes en la subcuenca, el municipio de Maltrata es que tiene más incidencia de actividades pecuarias, con la cría de porcinos de traspatio (78 granjas) y de caballos; le sigue el municipio de Atzitzintla en el que destaca la crianza de borregos (56 granjas); mientras que Nogales, Mariano Escobedo y C. Mendoza no superan las 90 granjas (Fig. 22).



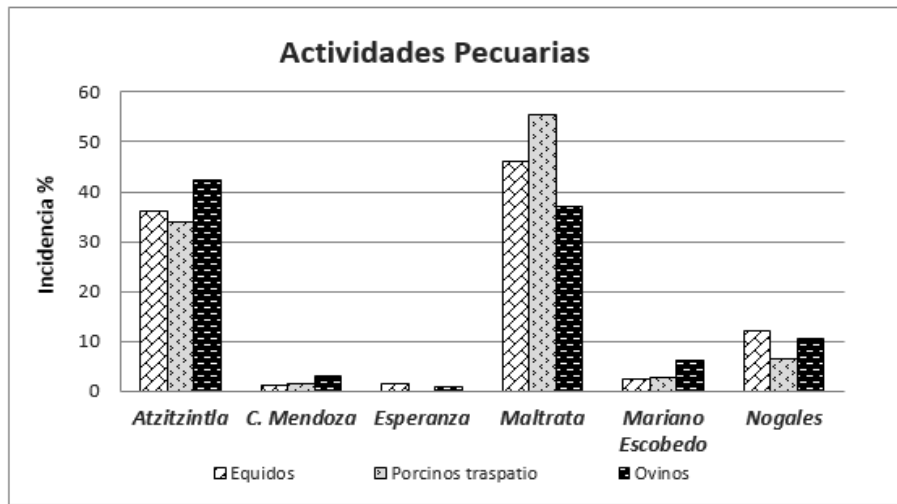


Figura 22. Actividades pecuarias por municipio (INEGI, 2007).

Finalmente, las actividades forestales tienen una mayor incidencia en los municipios de Nogales y Maltrata. Destacan la tala y los campos agrícolas que combinan actividades forestales en el municipio de Nogales, en tanto que la recolección de productos forestales es más común en el municipio de Maltrata. En cuanto a los municipios de Atzitzintla y Mariano Escobedo las prácticas forestales no son llevadas a cabo debido a la ausencia de bosque, mientras que el municipio de C. Mendoza al constituirse como área urbana las actividades forestales no son frecuentes (Fig. 23).

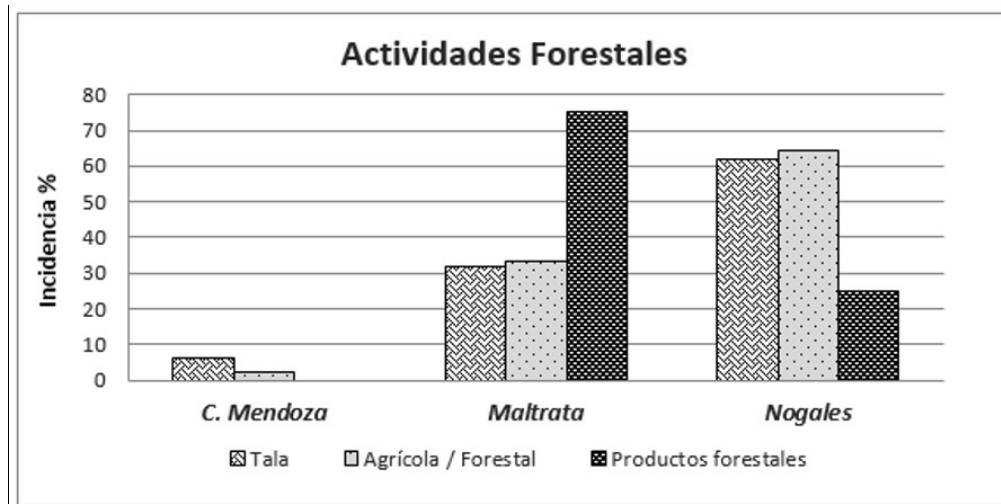


Figura 23. Actividades forestales por municipio (INEGI, 2007).

En resumen, el cambio de uso de suelo en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto ha sido constante desde 1542 con la implementación del primer Ingenio Azucarero de América (EMDM, 1999). El cambio frecuente ha sido la transformación de la vegetación natural en campos

agrícolas, la cual se intensificó a partir del programa agrario del presidente Luis Echeverría Álvarez en 1974, donde se permitía la remoción del bosque para establecer cultivos de papa y avena. Esta decisión alteró profundamente al bosque que se asentaba en los depósitos volcánicos del Pico de Orizaba, llevando a su desaparición en lo que se suponía era un área protegida decretada por el Presidente Lázaro Cárdenas en 1937. Tal destrucción masiva del bosque no solo llevó a que la vegetación natural se restringiera a las barrancas, sino también a una continua erosión de los depósitos volcánicos que al estar desprovistos de cubierta vegetal favorecieron los procesos de remoción en masa, tal como ocurrió en 1974 cuando se formó un barranco al oeste del Volcán después de la tala autorizada por el gobierno (EMDM, 1999). Dado lo anterior, se puede observar que la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto, es un área sumamente dañada en su vegetación natural por las actividades agrícolas, por lo que a corto plazo contribuye con los procesos de inestabilidad de laderas y a largo plazo a una desertificación de los suelos, situación que ocasionara la desaparición definitiva no solo de la vegetación natural sino también de la agrícola.

## **2.2 Materiales y métodos**

La metodología para evaluar la influencia del cambio de uso de suelo en la inestabilidad de laderas se evaluó en cuatro etapas principales: 1) Preparación de un mapa de relieve basado en criterios geomorfológicos; 2) Selección y elaboración de variables cartográficas; 3) Cálculo por proceso analítico jerárquico (PAJ) de la susceptibilidad a procesos gravitacionales por cambio de uso de suelo; y 4) Evaluación de la precisión del mapa de susceptibilidad a procesos gravitacionales por cambio de uso de suelo.

### **2.2.1 Relieve al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto**

Debido a la diversidad geológica de la subcuenca, se realizó un mapa de geoformas que permitió establecer unidades homogéneas donde se pueden identificar las causas de la incidencia de procesos gravitacionales derivados del cambio de uso de suelo al interior de la subcuenca. Para ello se hizo un análisis morfométrico y posteriormente se delimitaron las formas del relieve.

El proceso de obtención del mapa de geoformas comenzó con una evaluación morfométrica que evidenció los cambios más evidentes en la estructura del relieve. En dicha evaluación se procesaron mapas de altimetría, pendientes, densidad de disección y profundidad de disección.

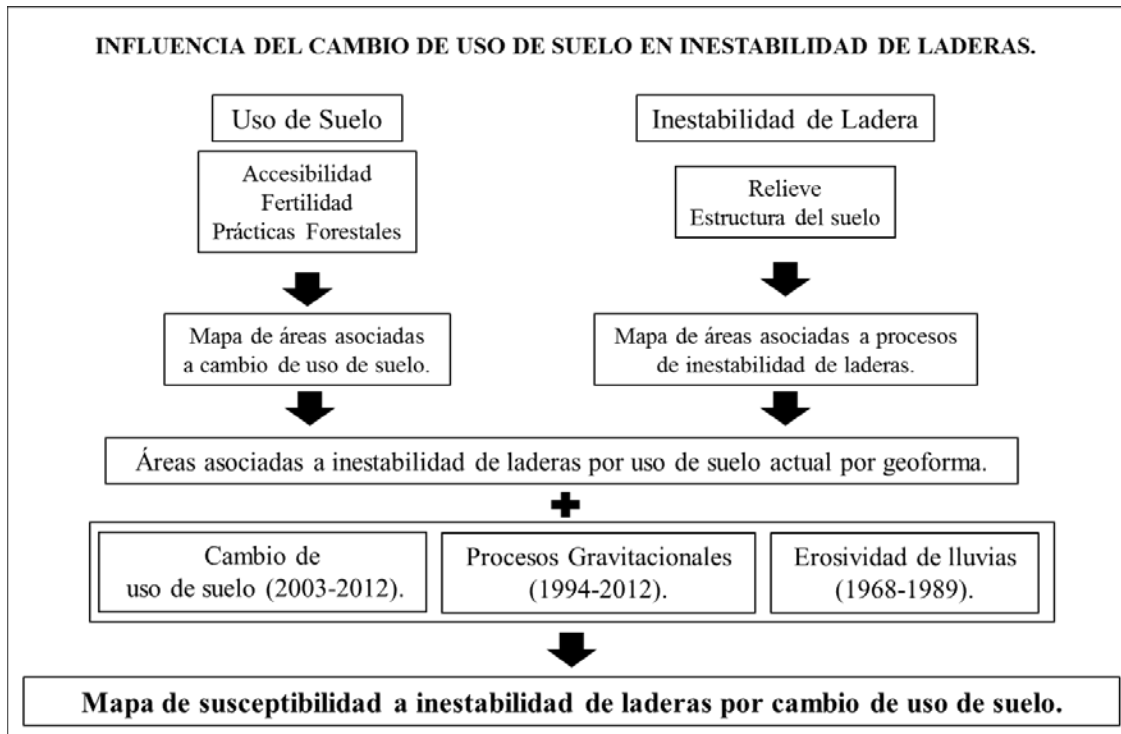
Para la elaboración de los mapas de altimetría y pendientes se trabajó con curvas de nivel a 20 m (INEGI, 2006) y un modelo de elevación digital de 15 m (INEGI, 2006), para clasificar la altitud e identificar los cambios máximos entre valores de altitud por pixel. En tanto que los mapas de densidad de disección y profundidad de disección se realizaron usando una red de drenaje, curvas de nivel a 20 m (INEGI, 2006) y una gradilla de 1 km<sup>2</sup>. La evaluación de la densidad de disección se midió la longitud total de los cauces por cada kilómetro cuadrado, mientras que para obtener la profundidad de disección se calculó la altura entre el cauce y el hombro de ladera basada en la diferencia de valores de la curva de nivel de mayor altitud y la menor altitud. Los valores obtenidos para cada la gradilla se vaciaron a un mapa de puntos centrales por kilómetro cuadrado y se hizo una interpolación de Kriging (Simonov, 1985 en Zamorano, 1990; Lugo-Hubp, 1991).

Posteriormente, se generó un mapa de geoformas con un enfoque desde la geomorfología ambiental (Lugo-Hubp, 2011), el cual nos permite identificar la relación entre el relieve y la actividad humana con la finalidad de recomendar zonas que necesiten ser restauradas para mitigar el peligro a procesos gravitacionales. Siendo así, para delimitar las formas del relieve en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto se utilizaron curvas de nivel a 20 m (INEGI, 2006), un modelo de elevación digital (INEGI, 2006), ortofotos 1:40,000 (INEGI, 2008), carta geológica-minera Orizaba E14-6 (SGM, 2000) e imágenes de Google Earth (23/01/2011), que se cotejaron con los mapas de altimetría, pendiente, densidad de disección y profundidad de disección. Además, para conocer la génesis de las geoformas identificadas en depósitos volcánicos, se recurrió a trabajos relacionados con la historia eruptiva del Volcán Pico de Orizaba como los de Robin y Cantagrel, 1982; Carrasco-Núñez et al., 1993; Höskuldsson y Robin 1993; Höskuldsson y Cantagrel, 1994; Carrasco-Núñez y Rose, 1995; Carrasco-Núñez y Gómez-Tuena, 1997; Carrasco-Núñez, 2000; Zimbelman et al., 2004; Macías, 2005 y Rossotti, 2005; ya que en ellos se encuentran descripciones de las etapas de formación de este Volcán y sus productos asociados que han moldeado a la subcuenca. Finalmente, para establecer el origen de los depósitos sedimentarios se revisó la descripción de la carta geológica-minera Orizaba E14-6 (SGM, 2000).

### **2.2.2 Determinación y evaluación de variables cartográficas en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto**

Para identificar las actividades antrópicas más comunes y evaluar cuáles eran las características que se repetían en los sitios con procesos de inestabilidad de ladera, se realizaron dos visitas al sitio de estudio y a partir de observaciones de campo se propuso un modelo teórico (Fig. 24), que nos permitió razonar cuáles son los usos de suelo actuales y cuáles son las variables que se asocian a

procesos de inestabilidad de ladera para ubicar las áreas asociadas a inestabilidad de laderas por cambio de uso de suelo.



**Figura 24.** Modelo teórico de la influencia del cambio de uso de suelo en la inestabilidad de ladera.

Para poder concretar el modelo teórico se evaluaron cuatro variables cartográficas: a) Cambio de cobertura vegetal (2003 y 2012) para reconocer cuales son las modificaciones derivadas del cambio de uso de suelo. b) Procesos gravitacionales (1994-2012) para identificar el impacto en los sitios que muestran un inventario histórico y reciente de inestabilidad de ladera. c) Erosividad por lluvias (1968-1989) para evaluar las consecuencias de las altas precipitaciones producto de la proximidad de la subcuenca con el Golfo de México (SMN, 2013). d) Áreas asociadas con la inestabilidad ladera por cambio de uso de suelo actual (2012) para identificar las características de los sitios con actual y potencial afectación por procesos gravitacionales derivados del cambio de uso de suelo.

#### **a) Cambio de cobertura vegetal (2003 y 2012)**

Para conocer el uso de suelo al interior de la subcuenca, se hizo un análisis de cubiertas en la zona de estudio, para ello se requirieron técnicas de percepción remota, análisis en sistemas de información geográfica e inventarios de vegetación y uso de suelo en campo. La metodología se dividió en tres etapas:

***i) Preprocesamiento de imágenes de satélite.***

En la evaluación de cubiertas al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto se adquirieron imágenes Landsat ETM y Landsat 8 en el portal Earth Explorer de la USGS (U.S: Geological Survey) e imágenes SPOT 5 a través del Laboratorio de Análisis GeoEspacial del Instituto de Geografía, UNAM. Las imágenes SPOT que se utilizaron para evaluar el cambio de uso de suelo, fueron colectadas para los meses de diciembre y enero de los años 2003 y 2012, ya que en ese periodo las imágenes tenían poca nubosidad, un ángulo de inclinación menor a 10° y no tenían pixeles dañados. Además, se utilizaron imágenes Landsat y SPOT para el mes de octubre de 2014, mes en que se tomaron la mayoría de las muestras con trabajo de campo para la evaluación de variables asociadas al cambio de uso de suelo e inestabilidad de ladera.

A todas las imágenes se le hizo una ortorectificación con respecto al modelo de elevación digital utilizando 350 puntos de control, ya que en las áreas superiores a los 4000 m s. n. m. la georreferencia de la imagen se distorsionaba generando un error de hasta 500m. Por otro lado, las imágenes al tener zonas de nieve mostraban una alta reflectancia, lo cual generó confusión al clasificar pixeles de nieve y pixeles de zonas urbanas. Es por ello que se hizo una corrección atmosférica absoluta con una regresión lineal del pixel oscuro. Dicha regresión se sustenta en que los niveles digitales del infrarrojo medio (1.5 a 10  $\mu\text{m}$ ) no están influenciados por los efectos atmosféricos, por lo tanto, la intersección de la ordenada de origen con el valor de brillo de los niveles digitales del espectro visible (0.4 a 0.7  $\mu\text{m}$ ) es el efecto atmosférico que debe restarse a la imagen, así es posible solo obtener la brillantez del paisaje y no del ruido de las imágenes. El modelo de regresión lineal del pixel oscuro desarrollado por Kaufman et al. (1997) es:

$$BV_{0.4\mu\text{m}} = mBV_{2.2\mu\text{m}} + b_{0.4\mu\text{m}}$$

Donde:

$$m = \frac{BV_{0.4\mu\text{m}}}{BV_{2.2\mu\text{m}}}$$

$BV_{0.4\mu\text{m}}$  = Valor de brillo en el rango electromagnético del visible.

$BV_{2.2\mu\text{m}}$  = Valor de brillo en el rango electromagnético del infrarrojo medio.

$b_{0.4\mu\text{m}}$  = Es la ordenada al origen.

***ii) Clasificación de uso de suelo.***

Obtenido el preprocesamiento de imágenes satelitales, se procedió a la identificación de los tipos de cubiertas al interior de la subcuenca, esto a partir de visitas de campo en las que se llegó al consenso

---

de que las clases que la representan son: nieve y hielo, suelo sin vegetación aparente, pastizal de alta montaña, bosque de coníferas, bosque de pino-encino, bosque de latifoliadas, matorral inerme, agricultura y asentamientos humanos.

Una vez identificadas las cubiertas, se realizó una clasificación supervisada con el software ENVI para conocer la distribución espacial de cada una de ellas al interior de la subcuenca. Para ello, en cada imagen SPOT de 2003 y 2012 se eligieron polígonos de entrenamiento o regiones de interés a través de gráficos de dispersión en una combinación RGB de las bandas verde-rojo-infrarrojo cercano, para el gráfico de dispersión se optó por el cruce de las bandas del rojo (banda 2) e infrarrojo (banda 3), las cuales muestran la actividad de la clorofila a través de la intensidad visual del rojo en las imágenes y por tanto contribuyeron a la discriminación de las clases en la subcuenca; lo anterior fundamentado en que la distribución de los niveles digitales de la imagen que representan cada clase o cubierta pertenecerá a una región del gráfico de dispersión (ENVI, 2004). Las regiones de interés se clasificaron por máxima verosimilitud, la cual identifica la máxima probabilidad de que un píxel pertenezca a una clase específica; el resultado fue un mapa con la distribución de las diferentes cubiertas de uso de suelo para cada año.

Posteriormente, el resultado de la clasificación se vectorizó para homogeneizar la distribución de cada una de las clases, reduciendo el efecto sal y pimienta que se generó al clasificar las imágenes, sobretodo en la cubierta de áreas urbanas, con ello se obtuvieron los mapas de uso de suelo para los años 2003 y 2012.

Por último, se hizo un análisis de las cubiertas de uso de suelo y se construyeron matrices de error para cada mapa tomando 270 puntos de verificación (30 puntos al azar por cubierta), con datos de referencia obtenidos en campo y datos de fotointerpretación de imágenes SPOT y Google Earth (23/01/11), lo anterior para validar los resultados de los mapas de uso de suelo que se generaron.

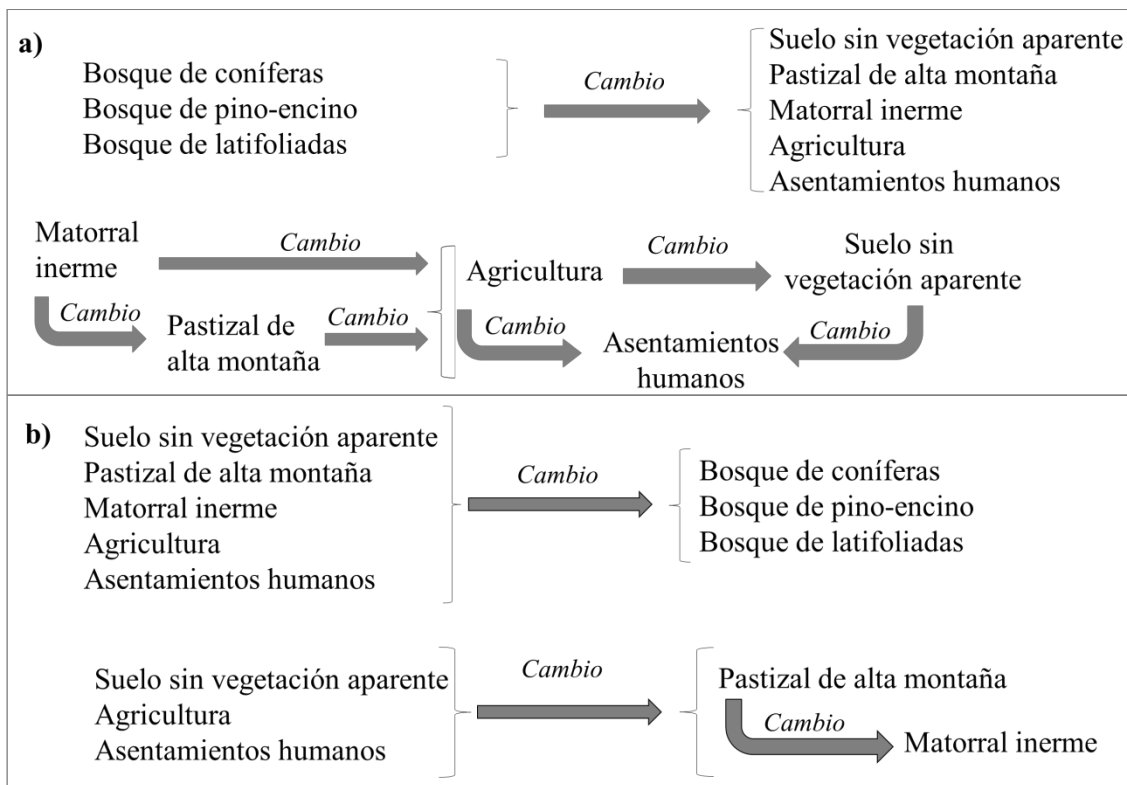
### ***iii) Análisis del cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012.***

Entre los años 2003 y 2012 ocurrieron cambios en la distribución de las cubiertas de uso de suelo. Para poder detectarlos se recurrió a medir el área a cada una de las cubiertas en el software ArcGIS 10.1, se compararon las cifras y se obtuvo la diferencia de cada cubierta en un periodo de nueve años.

Posteriormente, para poder entender el comportamiento de las cubiertas al interior de la subcuenca para estos nueve años, se evaluaron los cambios en su distribución al comparar los mapas de uso de

suelo de 2003 y 2012, lo anterior a través de la detección, comparación y delimitación de las diferencias en cada cubierta.

El proceso se realizó con los mapas de uso de suelo en formato vectorial, estos mapas se fusionaron en un solo archivo vectorial y se analizó la tabla de atributos del archivo resultante; en dicha tabla se observaron las entidades que se conservaron en la misma cubierta y las entidades que cambiaron de una cubierta a otra. A partir de las entidades que tuvieron un cambio en su cubierta, se generó un mapa de modificaciones al paisaje por cambio de uso de suelo, considerando las siguientes clases: Degradación (Fig. 25a) referida a las cubiertas de 2003 que cambiaron en 2012 a cubiertas con vegetación secundaria o deforestada; Estabilidad que se identifica como las cubiertas sé que mantuvieron del año 2003 al 2012 con el mismo uso de suelo; y Recuperación (Fig. 25b) que describe a las cubiertas de 2003 que cambiaron en 2012 a cubiertas con mayor desarrollo estructural y en composición de vegetación.



**Figura 25.** Cambio de cobertura vegetal. a) Degradación. b) Recuperación (Fuente: Elaboración propia, 2016).

### **b) Procesos gravitacionales (1994-2012)**

Para determinar la incidencia de procesos gravitacionales a través de técnicas de la percepción remota, se utilizaron ortofotos 1:75,000 (1995), ortofotos 1:40,000 (2008), un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI con imágenes SPOT 2003 y 2012) e imágenes de Google Earth (23/01/2011). Con dichos recursos se delimitaron áreas con ausencia de vegetación con extensiones mayores a un pixel en una imagen SPOT (10 m) y que coincidían con bajos valores de verdor (-0.157 a 0.1) en el NDVI. Para la tipificación de los procesos gravitacionales se partió inicialmente de la clasificación de Mendoza et al. (2000) quien realizó una síntesis de las clasificaciones de Sharpe, 1938, Nemcok et al., 1972, Varnes, 1978, Hutchinson, 1988, Sassa, 1989, Cruden y Varnes, 1996 y Dikau et al., 1996. La clasificación determina principalmente tres grupos de movimientos involucrados en la inestabilidad de laderas:

- ✓ Caídas o derrumbes (desprendimientos y vuelcos o volteos).
- ✓ Deslizamientos (rotacionales o asentamiento profundo y translacionales que incluyen a los someros superficiales y deslizamientos de escombros).
- ✓ Flujos (flujo de lodo, flujo de tierra o suelo, flujo de escombros, reptación y lahares).

No obstante, para robustecer los resultado se integró un inventario de 442 deslizamientos generados por Legorreta et al. (2014) a partir de ortofotos aéreas (1:20,000 de 1994 y 1:10,000 de 2008) y trabajo de campo. Este inventario tipifica los procesos gravitacionales basándose en los criterios que sigue el Washington State Department of Natural Resources (DNR), Forest Practices Division (2006) y que surgen de las clasificaciones de Wieczorek, 1984 y Cruden y Varnes, 1996 (Legorreta et al., 2014):

- ✓ Deslizamientos de asentamiento profundo.
- ✓ Deslizamientos de escombros.
- ✓ Deslizamientos someros superficiales.
- ✓ Flujos de escombros.
- ✓ Flujos de tierra.
- ✓ Volcaduras y caídas de rocas.

Siendo así, se integraron los procesos gravitacionales obtenidos por percepción remota con clasificación de Mendoza et al. (2000) a los que se integraron (Legorreta et al., 2014). Con ello se fusionaron ambas clasificaciones a fin de tener una sola tipificación para todos los procesos gravitacionales presentes en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto (Fig. 26).

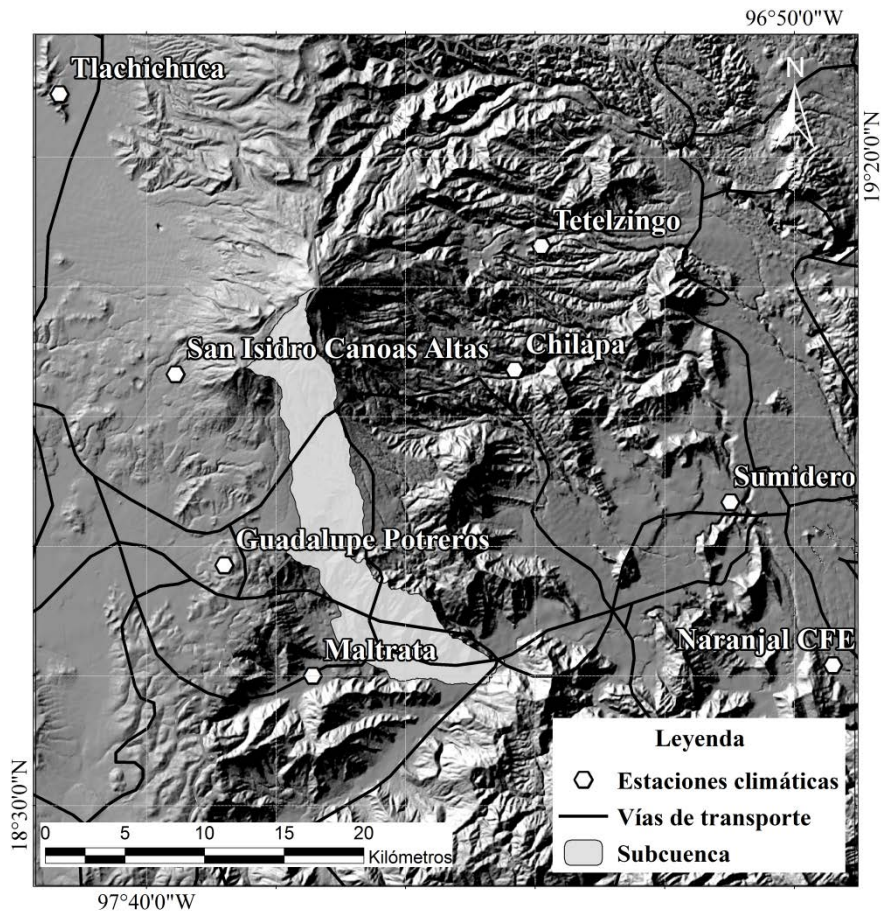




**Figura 26.** a) Ladera con caída de rocas. b) Pie de deslizamiento de asentamiento profundo. c) Deslizamiento somero superficial. d) Deslizamiento de escombros. e) Flujo de escombros. f) Flujo de tierra.

### c) Erosividad por lluvias (1968-1989)

Episodios de lluvia intensa son común denominador en muchos de los eventos de inestabilidad de ladera, ya sea por favorecer la erosión superficial o porque con su infiltración se saturan las laderas ocasionando un mayor peso en los materiales que posteriormente tienden a colapsar (Kerle et al., 2001; Scott, et al., 2004; Macías et al., 2006; Rodríguez et al., 2006; Saucedo et al., 2008 y Fukuoka, 2010). Dado lo anterior, en este estudio se consideró a la lluvia un factor desencadenante en los procesos gravitacionales, es por ello que, para poder asociar a la precipitación con la formación de procesos gravitacionales, se determinó la distribución de la erosividad al interior de la subcuenca a partir de una reconstrucción de datos de lluvias desde 1968 hasta 1989. Se estableció este periodo de tiempo para obtener la misma resolución espacial en todas las variables cartográficas, ya que no existen datos más recientes de precipitación para la mayoría de las estaciones climatológicas cercanas a la subcuenca, las cuales estas están actualmente inactivas y no cuentan con series de datos consecutivos. Dado lo anterior, las estaciones climatológicas que se evaluaron son Chilapa, Guadalupe Potrerros, Maltrata, Naranjal (CFE), San Isidro Canoas, Sumidero, Tetelzingo y Tlachichuca (Fig. 27).



**Figura 27.** Estaciones climatológicas evaluadas para la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

Para realizar la reconstrucción de datos de lluvia, se descargaron de la Base de Datos Climatológica Nacional (CLICOM, 2014) datos de precipitación mensual desde enero de 1969 a diciembre de 1989, correspondientes a las estaciones Guadalupe Potreros, San Isidro Canoas y Tlachichuca en el estado de Puebla; y Chilapa, Maltrata, Naranjal, Sumidero y Tetelzingo en Veracruz. Sin embargo, estas estaciones solo contaban con el 75% de los datos, por lo que para obtener series completas se recurrió al método de razones promedio (Pizarro et al., 2003).

$$PX = \frac{\overline{Px}}{N} * \frac{PA}{PA} + \frac{PB}{PB} + \dots + \frac{PN}{PN}$$

Donde:

$Px$  = Razón promedio.

$\frac{\overline{Px}}{N}$  = Promedio de precipitaciones en la estación de interés entre N estaciones de validación.

$\frac{PA}{PA} + \frac{PB}{PB} + \dots + \frac{PN}{PN}$  = Precipitación en estación de validación entre el promedio total de la misma.

Dada la cantidad de datos correspondientes a 22 años, se procedió a realizar un promedio móvil de los mismos solo para poder tener una visualización más limpia. La fórmula para promedios móviles es la siguiente:

$$PM_t = \frac{X_t + X_{t-1} + X_{t-2} + \dots + X_{t-n+1}}{n}$$

Donde:

PM = Promedio móvil en el periodo t.

$X_t$  = Valor real observado en el periodo t.

n = Número de datos para calcular la media aritmética.

Una vez que se tuvieron las series completas de precipitaciones históricas para la subcuenca con los datos del método de razones promedio, se procedió a evaluar la erosividad de la lluvia a través del índice de Fournier modificado, el cual estima la capacidad potencial de la lluvia para causar erosión en el suelos con base en la carga de sedimentos en ríos y considerando la lluvia de todos los meses del año (Arnoldus, 1980).

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} (p^2 / P)$$

Donde:

p = Lluvia mensual.

P = Lluvia anual.

Los resultados del índice de Fournier modificado para cada año se promediaron y se generó una base de datos que se agregó a una capa vectorial de puntos con las coordenadas de cada estación climatológica. Posteriormente esa capa se interpoló con el interpolador *kriging* (ordinario y gaussiano) y se obtuvo la distribución de la erosividad de lluvias para la subcuenca, la cual se clasificó con los rangos propuestos para el índice de Fournier modificado por Lobo et al., 2005 (Tabla 3).

**Tabla 3.** Rangos de erosividad de lluvia (Lobo et al., 2005).

Rango	Descripción
<60	Muy bajo
60-90	Bajo
90-120	Moderado
120-160	Alto
>160	Muy alto

#### **d) Áreas asociadas con la inestabilidad ladera por cambio de uso de suelo (2012)**

Para poder comprender la dinámica del uso de suelo e inestabilidad de ladera, se evaluaron sitios con procesos gravitacionales y se identificaron características comunes en varios de ellos. Con esta información se generaron dos grupos de variables el primero que incluye cualidades indicadoras de un posible cambio en el uso de suelo tales como accesibilidad, fertilidad de suelos y prácticas forestales actuales; en tanto que el segundo engloba características potenciales para la inestabilidad de ladera como son el tipo de relieve y la estructura del suelo. A continuación, se muestran los métodos para obtener datos de las variables sugeridas en este estudio:

##### ***i) Diseño de muestreo.***

Partiendo del modelo teórico (Fig. 24) se diseñó la obtención de datos tomando en cuenta que la distribución de variables se analizaría en imágenes de satélite, por lo que se consideró como unidades de muestreo a los pixeles de imágenes Landsat (1 pixel 30 x 30m) e imágenes SPOT (9 pixeles 10 x 10m) que presentaron vegetación natural con o sin manejo forestal. Lo anterior debido a que la subcuenca ha pasado por un intenso establecimiento de campos agrícolas, restringiendo la vegetación natural al área delimitada como Parque Nacional Pico de Orizaba o al interior de los cauces que es donde ocurren la mayoría de los procesos gravitacionales.

El método de muestreo parte de la hipótesis de este trabajo, la cual considera que las características propias de cada geofoma cambiarán la intensidad del impacto que tendrá el cambio de uso de suelo en la inestabilidad de ladera. Es por ello que se eligió un método de muestreo aleatorio estratificado, tomando en cuenta como estratos a las geofomas que posean vegetación natural, con ello se pueden definir sitios de muestreo con características similares evitando los posibles problemas por la alta variación que habría al comparar sitios de diferentes estratos o diferente origen geológico para este caso.

Para la determinación del número de sitios de muestreo, se tomó en cuenta que el área de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto es de 105.37 km<sup>2</sup>, lo que equivale a 1, 053,756 pixeles para muestrear en una imagen SPOT de 10 x 10 m; pero debido a la falta de recursos económicos y de tiempo no pueden tomarse tantos sitios de muestreo. Al respecto, Mas et al. (2003) menciona que en estadística tradicional al tratar de obtener un tamaño de muestra que presente una confiabilidad del 0.5 y una desviación estándar de 0.05 en poblaciones mayores a 10,000 unidades, el tamaño de muestra no cambia significativamente, esto debido a que la desviación estándar depende del tamaño de muestra, del tamaño de la población y de la proporción. Así, al considerar una mayor confiabilidad (p) y un menor el error (E) en una aproximación normal, se puede obtiene

un tamaño de muestra que otorga una estimación precisa de la confiabilidad del mapa. Es por ello que en este estudio para calcular el tamaño de muestra se tomó en cuenta un nivel de confianza del 95% ( $t = 1.96$ ), un margen de error del 10% y una  $p$  de 0.5, valores que se plantearon en la siguiente ecuación (Mas et al., 2003):

$$n = \frac{t^2 p (1 - p)}{\delta^2}$$

Donde:

$n$  = Tamaño de muestra.

$t$  = nivel de confianza.

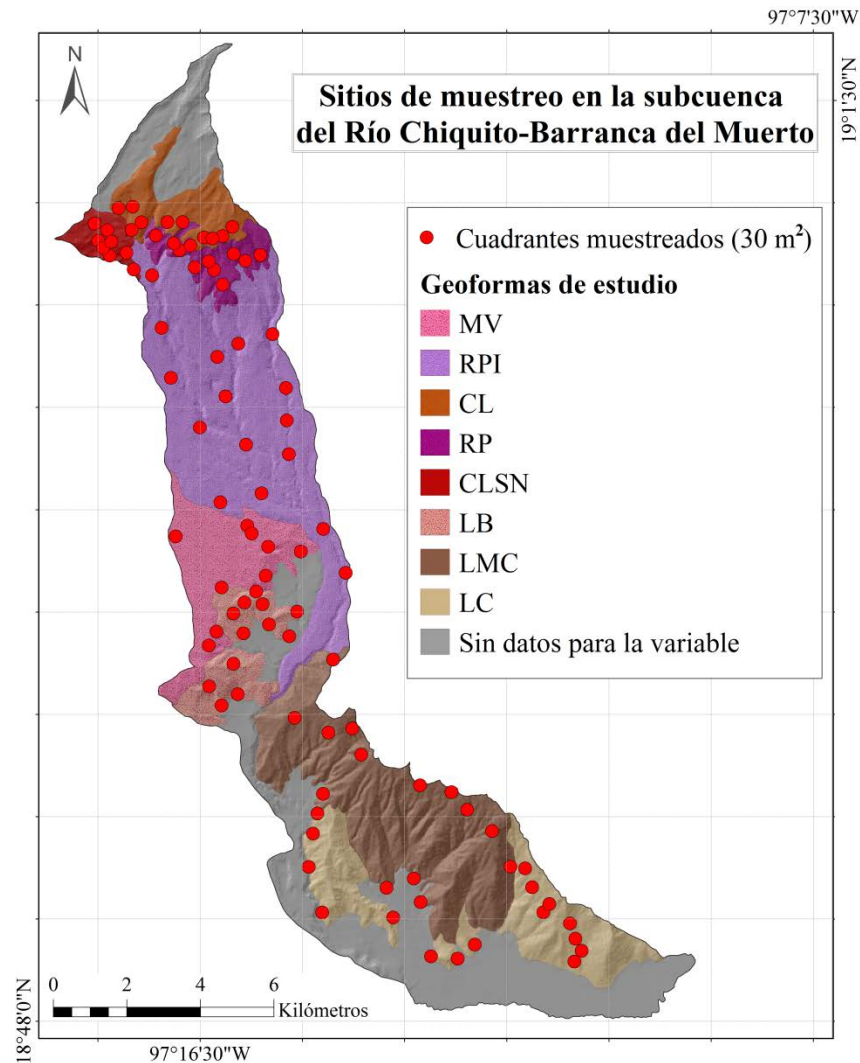
$p$  = Confiabilidad.

$\delta$  = Error (medio intervalo de confianza).

De acuerdo con la ecuación se muestrearon 96 sitios repartidos de acuerdo su extensión solo en las geoformas que presentan vegetación natural, la cual es propensa a tener un cambio de uso de suelo respecto a otros usos de suelo (Tabla 4 y Fig. 28).

**Tabla 4.** Puntos de muestreo por geoforma.

Geoforma.	Puntos de muestreo.	Extensión de vegetación natural (km <sup>2</sup> ).
<b>MV:</b> Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.)	9	1.8353
<b>RPI:</b> Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.)	15	8.7992
<b>CL:</b> Colada de lava (16,500 años A.P.)	10	2.2507
<b>RP:</b> Rampa piroclástica (16,500 años A.P.)	11	2.9528
<b>CLSN:</b> Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka)	8	1.2036
<b>LB:</b> Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno)	12	3.1306
<b>LMC:</b> Laderas de montaña de caliza (Cretácico)	16	16.8387
<b>LC:</b> Lomeríos de caliza (Mioceno-Plioceno)	15	8.781



**Figura 28.** Sitios muestreados al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

**MV:** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **RPI:** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **CL:** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP:** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **CLSN:** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **LB:** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC:** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC:** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

Finalmente se realizaron 2 visitas de campo, la primera en octubre 2013 y la segunda en octubre 2014, y en total se consideró a 32 variables contenidas en inventarios de vegetación arbórea y uso de suelo, relieve y edafología:

- Inventario de vegetación arbórea y uso de suelo.

Inicialmente se habían considerado cuadrantes de 50 x 50 m; sin embargo, en algunos sitios el uso de suelo ha restringido tanto a la vegetación que fue difícil encontrar cuadrantes de ese tamaño que solo tuvieran vegetación natural. Es por ello que se decidió cambiar a cuadrantes de 30 x 30 m, no

solo porque sería más fácil marcarlos sino porque se ajustan a la resolución espacial de las imágenes Landsat (1 píxel de 30 m) y SPOT (9 píxeles de 10 m). Siendo así, en cada cuadrante para la vegetación arbórea se cuantificó la riqueza (número de especies), la abundancia (número de individuos por especie) y la talla (altura por especie con ayuda de un distanciómetro Forestry Pro). Para valorar el uso de suelo se generaron un inventario dirigido a evaluar la presencia de aprovechamiento forestal (ocoteo, quema, ramoneo y tocones) e intervención humana en áreas forestales (actividades agrícolas, actividades pecuarias, remoción de hojarasca y reforestación), dichos inventarios recabaron datos para las áreas internas y circundantes de los cuadrantes de vegetación arbórea.

- Inventario de relieve.

Se realizó recabando información tanto del interior de los cuadrantes de vegetación arbórea como en las zonas adyacentes a ellos. Con el fin de tener datos de las geoformas y procesos erosivos que ahí ocurren se consideró la presencia de cauces, distancia a procesos gravitacionales, orientación de laderas, pendiente y densidad de árboles que protegen al relieve del impacto de las lluvias.

- Inventario de edafología.

La descripción de los suelos se hizo al interior o en sitios cercanos a los cuadrantes de vegetación arbórea (<10 m), la mayoría fue en cortes de terracería y en algunos casos se excavó un pozo de 1 m de profundidad o menos si la roca madre no permitía ir más allá. Todas las variables se obtuvieron siguiendo los criterios del Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo (Siebe et al., 2006). Además de las variables que se colectaron en campo directamente (estabilidad de agregados, densidad aparente, densidad con profundidad de raíces y textura), también se tomaron otras variables (color, estructura, humedad, materia orgánica, pH, poros y volumen de rocas) que a través de cálculos matemáticos permitieron la obtención del resto variables utilizadas en este estudio (agua disponible, bases intercambiables, capacidad de aireación, capacidad de campo, conductividad hidráulica, erosionabilidad, fosforo, humus, nitrógeno disponible y volumen total de poros) y la clasificación de los suelos.

***ii) Muestreo de variables asociadas inestabilidad de ladera por uso de suelo.***

El muestreo de variables se realizó por medio de inventarios en ellos se evaluaron diferentes variables asociadas al uso de suelo e inestabilidad de ladera. A continuación, se describe como se extrajeron los datos para cada variable:

- **Variables asociadas al uso de suelo.**

Se eligieron variables relacionadas con actividades antrópicas actuales que favorecen un cambio de uso de suelo en áreas forestales, lo anterior con la finalidad de ubicar áreas asociadas a un cambio de uso de suelo considerando la accesibilidad para llegar a ellas, la fertilidad de suelos tanto en su estructura como en su calidad edafológica y las prácticas forestales actuales como son el aprovechamiento de madera, la intervención agrícola, pecuaria o de cultivo arbóreo y sus cualidades como recurso forestal aprovechable a futuro:

Accesibilidad.

- ✓ Caminos: Se incluyen autopistas, carreteras, terracerías y brechas. Su presencia facilita el aprovechamiento forestal y el posterior establecimiento de campos agrícolas. Estas se delimitaron con ayuda de ortofotos 1:40,000 (2008), imágenes SPOT (2012), imágenes Landsat 8 (2013), imágenes Google Earth (2013) y verificaciones en campo.
- ✓ Pendiente: Orientada hacia inclinaciones bajas ya que las observaciones en campo mostraron que los campos agrícolas son más comunes en pendientes menores a 30°. La inclinación de la ladera se estableció usando inclinómetro de bolsillo tipo Suunto en campo y en gabinete se generó un mapa de pendientes a partir del modelo de elevación digital.

Fertilidad del suelo (Estructura edáfica).

Estas variables representan el flujo del agua en los suelos, se infieren a partir de la textura y la densidad aparente; y en caso de tener valores altos de materia orgánica se les aplica un factor de corrección. A los porcentajes obtenidos para la capacidad de agua disponible y la capacidad de campo, se les resta la influencia de gravas o piedras y se transforman a L/m<sup>2</sup> multiplicando el resultado por el espesor del suelo utilizando la siguiente ecuación:

$$dCC \text{ o } CC [L/m^2] = dCC \text{ o } CC (\text{Vol}\%) * ((100 - \text{piedras} [\text{Vol}\%]) / 100) * \text{espesor (dm)}$$

En el caso de la capacidad de aireación y volumen total de poros, los valores continúan en porcentajes y solo se les resta la influencia de gravas o piedras con esta ecuación:

$$CA \text{ o } VTP [\%] = CA \text{ o } VTP (\text{Vol}\%) * ((100 - \text{piedras} [\text{Vol}\%]) / 100)$$



**Tabla 5.** Evaluación del flujo de agua en los suelos (Modificada de Siebe et al., 2006).

Determinación de valores	Textura	dCC (%).			CC (%).			CA (%).			VTP (%).		
		Densidad aparente			Densidad aparente			Densidad aparente			Densidad aparente		
		b	m	a	b	m	a	b	m	a	b	m	a
	Arenosa	16	11	11	22	16	15	24	22	19	46	38	34
	Franco arenosa	24	20	17	34	29	25	11	9	7	45	38	32
	Franco limosa	27	24	21	41	34	32	9	7	4	50	41	36
	Franca	20	15	13	40	33	31	8	7	5	48	40	33
	Franco arcillo-arenosa	15	12	10	45	37	31	4	3	3	49	41	34
	Franco arcillo-limosa	20	16	14	42	36	32	7	6	4	49	42	36
	Franco arcillosa	16	12	9	45	38	33	50	4	3	50	42	36
	Arcillo arenosa	16	12	9	45	38	32	5	4	3	50	42	35
	Arcillo limosa	15	11	7	48	39	34	4	4	3	52	43	37

Factores corrección	Arcilla (%)	M. O.	dCC	CC	CA	VTP	Arcilla (%)	M. O.	dCC	CC	CA	VTP
< 5	1-2	+0.5	+1.5	-1.5	0	17-35	1-2	+0.5	+2.5	+0.5	+3	
	2-4	+1	+3.5	-1	+2.5		2-4	+1.5	+4	+1.5	+5.5	
	4-8	+3	+7.5	-1	+6.5		4-8	+4	+10	+3	+13	
	8-15	+3.5	+10	0	+10		8-15	+7	+14	+5	+19	
5-12	1-2	+0.5	+1.5	0	+1.5	35-65	1-2	+1	+2.5	+0.5	+3	
	2-4	+1	+3.5	+1	+4.5		2-4	+2.5	+5	+1.5	+6.5	
	4-8	+3	+8	+2	+10		4-8	+5.5	+11	+2.5	+13.5	
	8-15	+4	+12	+2.5	+14.5		8-15	+10	+15	+4.5	+19.5	
12-17	1-2	+0.5	+1.5	+0.5	+2	> 65	1-2	+2	+3.5	0	+3	
	2-4	+1	+3.5	+1.5	+5		2-4	+5	+7.5	0	+7.5	
	4-8	+3.5	+9	+2.5	+11.5		4-8	+11	+13	+1	+14	
	8-15	+4.5	+12	+5.5	+17.5		8-15	+16	+18	+2	+20	

dCC: Agua disponible CC: Capacidad de campo CA: Capacidad de aireación

VTP: Volumen total de poros M.O.: Materia orgánica b: baja m: media a: alta.

- ✓ Agua disponible: Es la cantidad de agua que puede ser absorbida por las plantas, esta variable solo considera poros con diámetro de entre 0.2 y 50 µm, ya que el agua no puede ser transportada en poros de menor diámetro. Los resultados se evalúan de la siguiente forma (Tabla 6):

**Tabla 6.** Evaluación del agua disponible en los suelos (Modificada de Siebe et al., 2006).

dCC (L/m <sup>2</sup> ).	<50		90	140	200<	
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta	

- ✓ Capacidad de aireación: Es el espacio relativo que ocupan los poros y es importante para el intercambio de gases que intervienen en la nutrición de raíces en cultivos y en la formación de materia orgánica. Los resultados se comparan en la tabla 7.

**Tabla 7.** Evaluación de la capacidad de aireación en los suelos (Modificada de Siebe et al., 2006).

CA (Vol%).	<3		7	12	18>
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta

- ✓ Capacidad de campo: Es la capacidad para retener agua en contra de gravedad, lo cual permite que los suelos se mantengan húmedos por más tiempo después de la temporada de lluvias, característica que favorece la profundidad fisiológica en cultivos. Se calcula considerando la textura y densidad aparente, su evaluación se hará con la tabla 8.

**Tabla 8.** Evaluación de la capacidad de campo en los suelos (Modificada de Siebe et al., 2006).

CC (L/m <sup>2</sup> ).	<130		260	390	520<
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta

- ✓ Volumen total de poros: Indica de forma indirecta la compactación y capilaridad del suelo, características que influyen en la disponibilidad de agua y aire que puede facilitar o inhibir el crecimiento y nutrición de las raíces en plantaciones agrícolas.

Todas estas variables se determinaron por medio de una tabla que evalúa la textura y la densidad aparente, la cual además considera una corrección cuando se tienen valores altos de materia orgánica (Tabla 9).

**Tabla 9.** Evaluación del volumen de poros en los suelos (Modificada de Siebe et al., 2006).

VTP (vol%).	<30		40	50	60>
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta

#### Fertilidad del suelo (Calidad edáfica).

- ✓ Bases intercambiables: Se refiere a la concentración de cationes Ca, Mg, K y Na (cmolc/kg), macronutrientes indispensables en el metabolismo y estructuras de las plantas, los cuales se encuentran en mayor concentración con un pH ácido en los suelos. Se infiere a partir de la capacidad de intercambio catiónico con la siguiente ecuación (Siebe et al., 2006).

$$BI \text{ (mol/m}^2\text{)} = CIC \text{ (cmol/kg)} * d.a. \text{ (g/cm}^3\text{)} * ((100 - \% \text{ piedras}) / 100) * \text{espesor (dm)} * 0.1$$

Dónde:

BI = Bases intercambiables.

CIC = Capacidad de intercambio catiónico.

d.a. = Densidad aparente.

Su evaluación se determina con la tabla 10.

**Tabla 10.** Evaluación de las bases intercambiables en los suelos (Modificada de Siebe et al., 2006).

BI (mol./m <sup>2</sup> ).	<5		10	100	200>
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta

- ✓ Fósforo: El abastecimiento de fósforo depende de la composición mineralógica y el intemperismo de los depósitos geológicos, en la presencia de materia orgánica humificada se refleja una concentración de fósforo, útil para el metabolismo y crecimiento de tallos y hojas, su deficiencia se refleja en plantas poco desarrolladas con áreas necrosadas. Su estimación parte de la cantidad de humus que tenga el suelo multiplicado por un factor que varía dependiendo el tipo de mantillo que se presente (Mull 10, Moder 1.5 y Mor 0.8). La evaluación se mide con los siguientes valores (Tabla 11):

**Tabla 11.** Evaluación del fósforo en los suelos (Modificada de Siebe et al., 2006).

P <sub>mo</sub> (g/m <sup>2</sup> ).	<10		60	180	240>
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta

- ✓ Nitrógeno disponible: El nitrógeno orgánico no puede ser aprovechado por las plantas, pero al mineralizarse con la acción de bacterias en el suelo y raíces de plantas logra combinarse con óxidos formando nitratos, lo que convierte al nitrógeno en disponible para la vegetación. Su deficiencia en las plantas ocasiona cambios de coloración e inhibición de crecimiento. Se determina a través de la concentración de humus multiplicada por un factor de acuerdo al tipo de mantillo (Mull 0.25, Moder 0.08 y Mor 0.03). Se evalúa de la siguiente manera (Tabla 12):

**Tabla 12.** Evaluación del nitrógeno disponible en los suelos (Modificada de Siebe et al., 2006).

N <sub>d</sub> (g/m <sup>2</sup> ).	<2		4.5	12	80>
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta

- ✓ Humus: Se forma en la capa más superficial del suelo por la descomposición de materia orgánica, su morfología deriva de un mantillo que se clasifica dependiendo de la actividad biológica, dinámica de formación de materia orgánica, tipo de sustancias húmicas, secuencia y espesor de sus horizontes (Mull, Moder o Mor). Para calcular la concentración de humus por metro cuadrado se aplica la siguiente ecuación (Siebe et al., 2006).

$$\text{Humus (kg/m}^2\text{)} = \% \text{ m.o.} * \text{d.a. (kg/dm}^3\text{)} * (100 - \% \text{ piedras} / 100) * \text{espesor (dm)}$$

Donde

m.o. = Materia orgánica.

d.a. = Densidad aparente en campo.

#### Prácticas forestales (Aprovechamiento).

- ✓ Ocoteo: Es una práctica de manejo forestal no sustentable que extrae rajadas de madera que contienen resina, lo cual sirve principalmente como combustible para cocinar. Esta práctica debilita y llega a matar al árbol, por lo que a la larga se tiene que cortar y por lo tanto favorece las prácticas de tala ilegal. Para evaluarla se cuantifican individuos con cortes cóncavos verticales en su tronco.
- ✓ Quema: Esta práctica es común cuando se hacen quemadas controladas para fertilizar suelos agrícolas. No obstante, estas quemadas pueden pasar a áreas boscosas, matorrales o pastizales y favorecer su posterior cambio de uso de suelo. Se evalúa contabilizando individuos con daño en la corteza de su base por fuego.
- ✓ Ramoneo: Es una práctica que consiste en cortar ramas de árboles para utilizar como combustible para la preparación de alimentos. Es una actividad que ocasiona la entrada de plagas al interior de los árboles, lo cual conduciría a su muerte y posterior tala. Se determina con la cuantificación de individuos con evidencia de ramas cortadas y cobertura de ramas en el suelo.
- ✓ Tocones: Estos son una evidencia indiscutible de la tala de árboles. Para la mayoría de las regiones del Parque Nacional Pico de Orizaba esta tala se hace para poner troncos de retención de suelos, pero en el resto de la subcuenca su presencia responde a la tala ilegal. Se consideraron troncos que solo tenían sus raíces y parte de su base como consecuencia de tala.

#### Prácticas forestales (Intervención).

- ✓ Actividades agrícolas: Se registró si los sitios de muestreo tenían campos de cultivo adyacentes, ya que esto es un indicador de un potencial cambio de uso de suelo por apropiación de espacios con vegetación natural que pueden contener suelos fértiles para la agricultura.
- ✓ Actividades pecuarias: Es la presencia de ganado bovino y ovino que se mantiene del pastoreo en áreas de bosque y con ello fomenta los procesos erosivos de las áreas de

vegetación natural. Su evaluación fue el registro de la presencia de ganado ovino y bovino en los cuadrantes muestreados y zonas contiguas.

- ✓ Hojarasca: Se refiere a las hojas que desprenden los árboles y forman un estrato superficial en el suelo, su espesor y características físicas, químicas y biológicas dependerán del tipo de árboles del cual provengan las hojas. Un indicador de perturbación al interior de un bosque se expresa por su ausencia o distribución irregular, lo cual se atribuye a la tala y procesos erosivos derivados de actividades antrópicas o pecuarias. Se consideró el porcentaje de hojarasca en el suelo al interior de los cuadrantes muestreados.
- ✓ Reforestación: Es una actividad que consiste en establecer individuos arbóreos en zonas donde se busca recuperar o aprovechar parte del bosque que ya ha tenido algún tipo de manejo forestal. Esta actividad no respeta la distribución natural que se da por competencia interespecífica de las especies que conforman un bosque, lo que puede conducir a sobrecargar el peso de una ladera y contribuir a la formación de procesos de remoción en masa. Su determinación fue por el registro de árboles de la misma talla y especie sembrados de forma alineada en los cuadrantes y áreas adyacentes.

#### Prácticas forestales (Recurso potencial).

- ✓ Riqueza: Es el número de especies que componen una comunidad. En el uso de suelos se espera que los sitios que presenten especies de coníferas y encinos tengan mayor intervención antrópica con respecto a sitios donde no se encuentren dichas especies.
- ✓ Abundancia: Es el número de individuos por especie que integran una población. Las comunidades arbóreas con más abundancia de especies de coníferas y encinos pueden ser más intervenidas con actividades forestales.
- ✓ Talla: Se refiere a la altura que poseen los individuos de cada especie dentro de una comunidad forestal. Una vegetación con árboles altos es más atractiva para la tala.

- **Variables asociadas a la inestabilidad de laderas.**

Para poder ubicar sitios propensos a inestabilidad de laderas, se consideraron variables relacionadas con características estructurales y con factores que propician erosión en los suelos, mismas que pueden derivar en procesos gravitacionales. El muestreo considero información del relieve, de la estructura de los suelos y de variables que coadyuvan a la determinación de las anteriores; esta información se muestreo tanto en el interior de los cuadrantes como en las zonas adyacentes, con el

fin de tener datos más completos del área que cubre las geoformas y procesos erosivos que ahí ocurren.

### Relieve.

- ✓ **Cauces:** Es la porción inferior de un valle fluvial, su presencia representa un cambio de pendiente que de acuerdo a su inclinación y material geológico que lo constituya puede favorecer la incidencia de procesos gravitacionales. Se delimitó una red hídrica a partir de curvas de nivel y en campo se georreferenciaron los sitios con presencia de barrancos utilizando un GPS Garmin Rino 655t.
- ✓ **Distancia a procesos gravitacionales:** En el área de estudio se observó que en sitios circundantes a procesos gravitacionales se podían desencadenar más procesos erosivos en áreas de mayor pendiente; siendo así, la distancia a procesos gravitacionales se consideró como un indicador de inestabilidad de ladera. Para determinar la distancia a procesos gravitacionales en función de su pendiente, se partió del mapa de procesos gravitacionales y se le aplicó un buffer de anillos múltiples con 100 m dividido cada 10 m, esta capa de rasterizó y se sumó ponderadamente con el mapa de pendientes.
- ✓ **Orientación:** La humedad de las laderas está en función de su exposición, situación que puede contribuir a los procesos gravitacionales posteriores a la temporada de lluvias, ya que las laderas norte que presentan menor radiación solar tendrán sus depósitos más saturados de agua y con ello serán más susceptibles. La exposición de la ladera se tomó con una brújula Brunton.
- ✓ **Pendiente:** Es la inclinación de una superficie que cuando se conjuga con procesos erosivos y materiales geológicos inestables, facilita la presencia de diferentes procesos gravitacionales. La inclinación de la ladera se estableció usando inclinómetro de bolsillo tipo Suunto.
- ✓ **Protección al relieve:** El dosel de los árboles interfiere en la intensidad del impacto de las gotas de lluvia tanto el suelo como los materiales geológicos expuestos, lo cual inhibe el desarrollo de procesos erosivos. Se verificó la densidad de árboles a partir de datos de abundancia arbórea en sitios con presencia de procesos gravitacionales, esos datos se interpolaron y se sumaron al mapa de distancia a procesos gravitacionales para determinar áreas en las que los procesos erosivos no serían tan intensos.

Estructura del suelo.

- ✓ Conductividad hidráulica: Es una propiedad física que contribuye a la transmisión de agua y aire en los suelos. Los valores bajos representan suelos saturados en temporada de lluvias, que si se combinan con materiales geológicos intemperizados puede desencadenar procesos gravitacionales, al facturar, desestabilizar y generar más peso en dichos materiales. Se estima en una tabla a partir de la textura y la densidad aparente. Los suelos más arenosos con densidad aparente baja presentan una mayor conductividad hidráulica con respecto a los suelos arcillosos con densidad aparente alta. La evaluación se hace de la siguiente forma (Tabla 13):

**Tabla 13.** Evaluación de la conductividad hidráulica en los suelos (Modificada de Siebe et al., 2006).

Kf (g/día).	<1		10	100	300>
Evaluación	Muy baja	Baja	Mediana	Alta	Muy alta

- ✓ Densidad aparente: Es la medida de peso del suelo por unidad de volumen ( $\text{g/cm}^3$ ) y un indicador de compactación de suelos que influye en la permeabilidad y profundidad fisiológica, los valores extremos pueden relacionarse con procesos gravitacionales ya que una densidad aparente alta se traduce en suelos con saturación de agua y poca aireación factores que aceleran el intemperismo en los materiales geológicos, mientras que una densidad aparente baja representa suelos poco estructurados. Se estimó introduciendo una navaja en cada horizonte y siguiendo descripciones de acuerdo al tipo de textura (Tabla 14).

**Tabla 14.** Evaluación de la densidad aparente (Tomada de Siebe et al., 2006).

Característica: (valido para suelos secos)	Densidad aparente ( $\text{g/cm}^3$ )			
	Arenas y limos	Francos	Arcillosos	Evaluación
El cuchillo sólo se puede introducir bajo fuerzas mayores, la muestra casi no se desmorona	> 1.9	> 1.8	> 1.6	Alta
El cuchillo sólo se introduce con dificultad 1 a 2 cm en el suelo, la muestra se desmorona en pocos fragmentos que sólo se pueden partir con dificultad	1.8	1.6	1.4	Mediana
El cuchillo se puede introducir en el suelo con poco esfuerzo, la muestra se desmorona en pocos fragmentos, los cuales pueden ser partidos en fragmentos más pequeños con la mano.	1.6	1.4	1.2	
Al presionar suavemente, el suelo se desmorona en muchos fragmentos	1.4	1.2	1.0	Baja
La muestra se desmorona totalmente al tomarla, se ven muchos poros gruesos y muy gruesos.	1.2	1.0	-	

- ✓ Erosionabilidad: Es una medida de la susceptibilidad a procesos erosivos, infiere si la absorción de lluvia y resistencia de los suelos cede ante la erosión. Lo anterior considerando la textura, contenido de materia orgánica, estabilidad de agregados y permeabilidad en los suelos. Se estima con un nomograma que considera textura, estabilidad de agregados y conductividad hidráulica (Fig. 29).

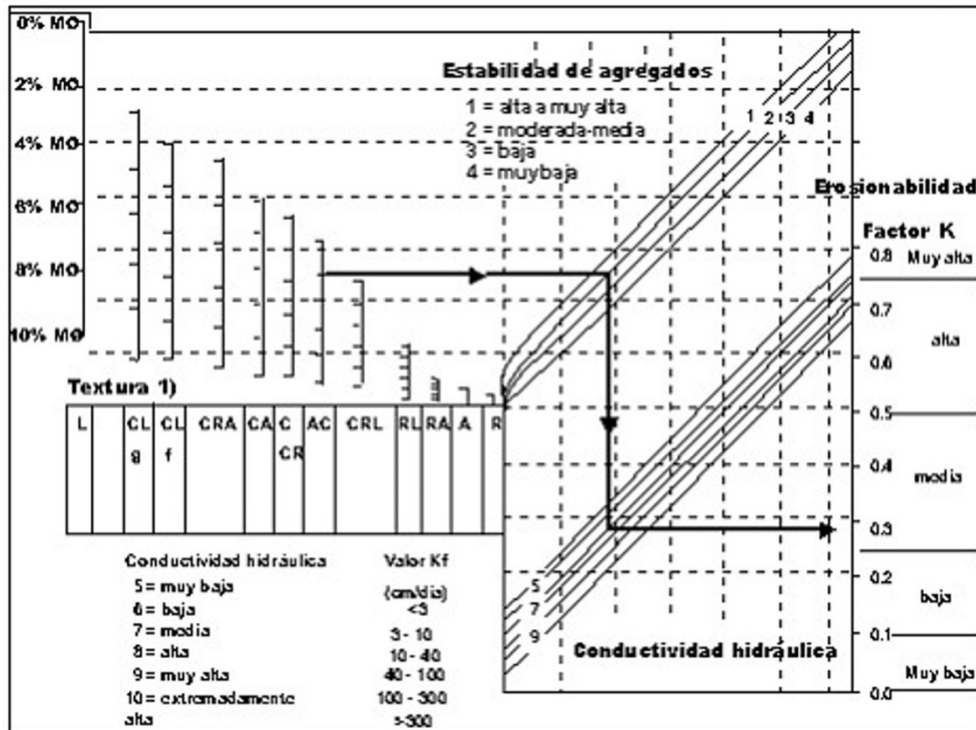


Figura 29. Nomograma para la estimación de la erosionabilidad en suelos (Tomada de Siebe et al., 2006).

- ✓ Estabilidad de agregados: Determina la penetrabilidad de raíces y la resistencia de los suelos al intemperismo por agua o viento. En un recipiente se saturaron con agua 10 agregados de suelo con diámetros de entre 3 y 10 mm, se les hizo rotar ligeramente por 30 segundos y se determinó la pérdida de estructura o descomposición del agregado. La evaluación se realiza con la tabla 15 (Modificada de SEKERA, en Schlichhting y Blume, 1996, cita de Siebe et al., 2006):

Tabla 15. Evaluación de la estabilidad de agregados en los suelos (Modificada de Siebe et al., 2006).

Grado de descomposición.	Evaluación.
No hay descomposición solo fragmentos grandes.	Muy alta.
Dominan los fragmentos grandes sobre los pequeños.	Alta
Igual número de fragmentos grandes y pequeños.	Mediana.
Dominan los fragmentos pequeños sobre los grandes y hay turbidez en el agua.	Baja.
Descomposición total y alta turbidez del agua.	Muy baja.



- ✓ Profundidad de raíces: Las raíces puede favorecer la estabilidad de los suelos al crear una red de contención para los agregados, no obstante, el desarrollo de raíces gruesas deriva tanto en la ruptura de la estructura del suelo como en la fracturación e intemperismo de materiales geológicos. En la densidad de tomo un decímetro cuadrado y se cuantificó el número de raíces menores a 2 mm, en tanto que para la profundidad se midió la distancia del mantillo al punto más bajo que alcanzo a introducirse.
- ✓ Textura: Es la distribución de los tamaños de partículas que constituyen la estructura de los suelos y se dividen en arcillas (< 0.002 mm de diámetro), limos (0.002 a 0.02 mm de diámetro) y arenas (0.02 a 2mm de diámetro). Suelos con mayor contenido de arenas suelen ser menos consolidados y por lo tanto más propensos a generar procesos de inestabilidad de ladera. Para determinar la textura se humedeció una muestra de suelo y la designación de arcilla, limo o arena se apoyó en una clave textural que evalúa características de moldeado, consistencia y granulometría al manipularla con los dedos. El porcentaje de arena en cada textura se obtuvo con un diagrama triangular de texturas.

#### Otras variables.

Para poder realizar las ecuaciones en variables edafológicas se requirió del muestreo y análisis en campo de las siguientes de variables:

- ✓ Color: Se tomó una muestra húmeda de suelo y se comparó con una tabla de color Munsell que considera el matiz, la pureza y la intensidad.
- ✓ Estructura: Se definió la macroestructura de los agregados de suelo por su forma, tamaño y grado de desarrollo. Se partió de tener suelos estructurados de agregación natural (migajón, granular, subangular en bloques, angular en bloques, prismática y columnar).
- ✓ Humedad: Se tomó un poco de muestra y se le hicieron pruebas de sequedad, moldeabilidad y color.
- ✓ Materia orgánica: Se utilizaron los valores de textura, pH y color del suelo en un nomograma para obtener el contenido de materia orgánica (Fig. 30).

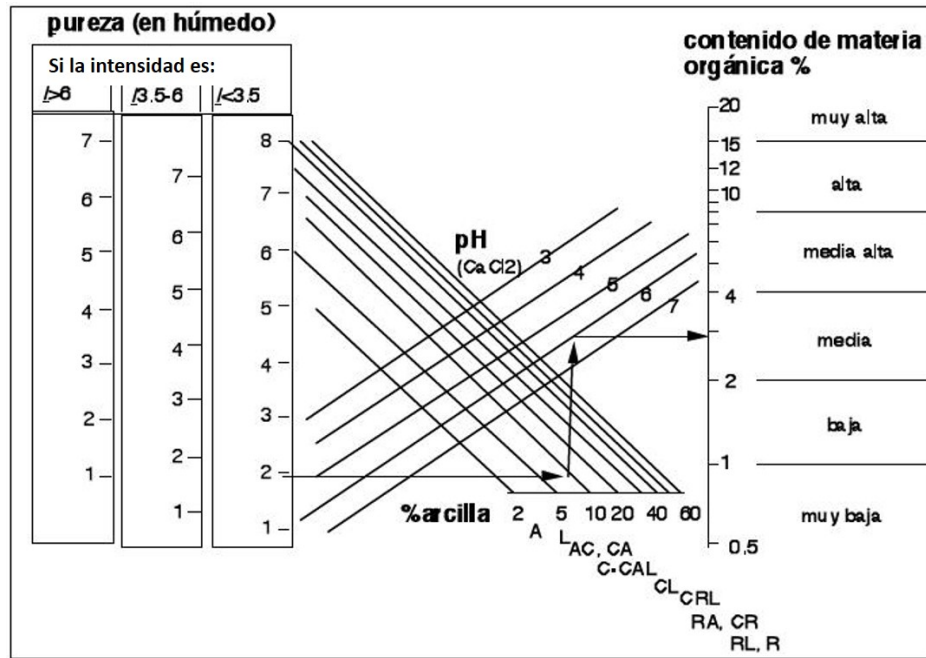


Figura 30. Nomograma para materia orgánica (Renger et al., 1987 en Siebe et al., 2006).

- ✓ pH: Se hizo una solución 2:1 de muestra de suelo con agua destilada, la cual se agitó, se dejó reposar 15 minutos y se obtuvo su pH con papel indicador.
- ✓ Poros: En un decímetro cuadrado se determinó su abundancia, tamaño, distribución y forma.
- ✓ Volumen de rocas: Se reportó el porcentaje de rocas, el tamaño dominante y el tipo de partículas gruesas.

**iii) Preprocesamiento para la identificación de áreas asociadas a procesos gravitacionales por uso de suelo.**

En esta etapa se dividieron las variables analizadas en tres grupos variables discretas, variables continuas con distribución conocida y variables continuas con distribución desconocida.

En el primer grupo se tomaron variables con datos puntuales de presencia/ausencia para actividades agrícolas, pecuarias, riqueza y reforestación o número de individuos afectados por ocoteo, quema, ramoneo y tocones; para cada variable se realizó una interpolación (ordinaria y lineal) para determinar su distribución. Los raster resultantes se recortaron para cada geoforma de acuerdo al límite de vegetación natural.

En el segundo grupo se consideraron aquellas variables que se generaron con percepción remota como son caminos, cauces, distancia a procesos gravitacionales, orientación de ladera, pendiente y

protección al relieve, para cada una de ellas se generó un raster delimitado por la vegetación natural de cada geoforma. Además, se utilizaron buffers segmentados cada 10 m para las variables caminos (150 m) y cauces (50 m), esto con la finalidad de representar la posible afectación por cambio de uso de suelo o inestabilidad de ladera que podría ocurrir en áreas circundantes.

Por último, en el tercer grupo se ubicaron a las variables restantes (abundancia arbórea, bases intercambiables, capacidad de agua disponible, capacidad de aireación, capacidad de campo, cobertura de hojarasca, concentración humus, conductividad hidráulica, densidad aparente, erosionabilidad, estabilidad de agregados, fósforo en materia orgánica, nitrógeno disponible, profundidad de raíces, talla arbórea máxima, textura y volumen total de poros) para las que se tenían datos continuos puntuales tomados en campo, y se generaron en el software SAGA GIS 19 raster correspondientes a composiciones RGB en imágenes Landsat 8 (Octubre, 2014) e índices de percepción remota a partir de imágenes SPOT (Octubre, 2014).

Los índices de percepción remota y composiciones RGB utilizados fueron los siguientes:

1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (Rouse et al., 1974). Separa el verdor de la vegetación del brillo del suelo, al ser sensible a la clorofila puede discernir la vegetación sana de la estresada; la vegetación se muestra en píxeles brillantes (Mróz y Sobieraj, 2004; Silleos et al., 2006).
2. Índice de vegetación diferenciada (Richardson y Wiegand, 1977). Es un índice de vegetación que pondera la banda del infrarrojo cercano con la pendiente de la línea de suelo, en la distribución de píxeles en el espectro del rojo contra el infrarrojo cercano. Los valores negativos indican áreas de agua, cercanos a cero corresponden a cubiertas de suelo desnudo y positivos se refieren a vegetación (Mróz y Sobieraj, 2004; Silleos et al., 2006).
3. Índice de vegetación mejorado (Huete et al., 1988). Es una modificación del NDVI con un factor de ajuste para suelo y dos coeficientes que corrigen los efectos atmosféricos, sirve para resaltar variaciones estructurales de la vegetación (Tipo de dosel, área foliar o fisionomía de las plantas); los píxeles brillantes corresponden a la vegetación (Silleos et al., 2006).
4. Índice de vegetación transformado de Thiam (Richardson y Wiegand, 1977). Es una modificación al índice de vegetación de diferencia normalizada (Rouse et al., 1974) y al índice transformado de vegetación (Deering et al., 1975), cuestiona que introducir una constante 0.5 en la fórmula no siempre elimina valores negativos y sobreestima el verdor; la vegetación tiene píxeles brillantes (Mróz y Sobieraj, 2004; Silleos et al., 2006).

5. Índice perpendicular de vegetación (Richardson y Wiegand, 1977). Considera la distancia perpendicular de cada pixel con la línea de suelo del gráfico de dispersión de la banda roja con la banda del infrarrojo cercano, los pixeles oscuros corresponden a vegetación (Silleos et al., 2006).
6. Índice perpendicular de vegetación (Perry y Lautenschlager, 1984). Es una corrección al PVI de Richardson y Wiegand, 1977, el cual no separa el agua proveniente de la vegetación. Este índice considera que todos los pixeles que correspondan a vegetación se ubiquen a la derecha de la línea de suelo y en pixeles brillantes (Mróz y Sobieraj, 2004; Silleos et al., 2006).
7. Índice perpendicular de vegetación (Walther y Shabaani, 1991). Es un índice que considera el infrarrojo cercano con el rojo para detectar vegetación en periodo de secas, esta se muestra en pixeles oscuros (Mróz y Sobieraj, 2004; Silleos et al., 2006).
8. Índice perpendicular de vegetación (Qi, et al., 1994). Es una ponderación de la banda roja con la intersección de la línea de suelo, en el gráfico de dispersión de la banda roja con la del infrarrojo cercano; en la imagen se observa a la vegetación en pixeles brillantes (Silleos et al., 2006).
9. Índice transformado de vegetación ajustado a suelo (Baret et al- 1989). Es una modificación del índice de vegetación ajustado a suelo (Huete, 1988), tomando en consideración el índice perpendicular de vegetación (Richardson y Wiegand, 1977); con ello se obtiene un índice para vegetación en zonas semiáridas pero no es útil en áreas con vegetación densa que se muestra en pixeles oscuros (Mróz y Sobieraj, 2004; Silleos et al., 2006).
10. Índice transformado de vegetación ajustado a suelo (Baret and Guyot, 1991). Es la corrección al índice transformado de vegetación ajustado a suelo (Baret et al- 1989), agregando un factor que minimiza los efectos de brillantez del suelo desnudo y se los otorga a la vegetación (Mróz y Sobieraj, 2004; Silleos et al., 2006).
11. Tasseled Cap (Kauth y Thomas, 1976). Es una transformación ortogonal que toma las bandas espectrales de imágenes de satélite y genera tres nuevas bandas, la vegetación se muestra en pixeles oscuros (Silleos et al., 2006):
  - 11a. Brillo. Es una banda que muestra los cambios de reflectividad en la imagen debido a que es la suma ponderada de todas las bandas espectrales, el suelo desnudo se observa en pixeles brillantes y la vegetación en pixeles oscuros.

11b. Verdor. Destaca el verdor producto de la comparación entre el visible y el infrarrojo, surge de una ponderación positiva de las bandas 4 y 5 (Landsat ETM) y una negativa en el resto de las bandas, la vegetación se presenta en píxeles brillantes.

11c. Humedad. Muestra el contenido de humedad de la vegetación en píxeles brillantes y se genera por una ponderación negativa en el infrarrojo medio.

12. RGB-465 (354 Landsat ETM). Es utilizada para realzar suelos desnudos, rocas detríticas terciarias, contactos graníticos y procesos erosivos; estos elementos se observan en píxeles brillantes y la vegetación en píxeles oscuros (Martín et al., 2007).
13. RGB-653 (542 landsat ETM). Es una combinación útil para visualizar cuerpos de agua, suelos desnudos, con pastizales, con disturbio por incendio y campos agrícolas; la vegetación se muestra en píxeles oscuros (Ledezma, 2013; Zuñiga, 2014).
14. RGB-654 (543 landsat ETM). Muestra cubiertas vegetales sanas, con estrés o mortalidad en píxeles oscuros (Martínez y Martín, 1992).
15. RGB-753 (742 landsat ETM). Se utiliza para definir distintos tipos de vegetación, zonas quemadas y afloramientos de esquistos o areniscas en píxeles brillantes (Martín et al., 2007).
16. RGB-763 (752 landsat ETM). Sirve para realzar vegetación en píxeles oscuros, y suelos desnudos o alteraciones hidrotermales en píxeles brillantes (Irigoyen et al., 2011; Díaz, 2012).

Si bien pareciera que algunos de los índices de percepción remota y composiciones RGB son redundantes, es necesario recordar que en la subcuenca existen dos principales regiones geológicas (volcánica y sedimentaria) y tres diferentes grupos de vegetación predominante (bosque de coníferas, bosque de coníferas con latifoliadas y bosque de latifoliadas con coníferas), situación que se ve reflejada en la distribución de niveles digitales de las imágenes de satélite, ya que un mismo raster con un índice o composición RGB puede explicar diferentes variables dependiendo en la geoforma que se esté analizando; pero también una misma variable se puede explicar con diferentes raster respondiendo de igual manera según la geoforma en que se evalúe.

Dado lo anterior, los raster obtenidos se recortaron con la finalidad de tener 19 rasters de índice de percepción remota o composición RGB para cada geoforma delimitados por la vegetación natural. En cada uno de ellos se retomaron los valores de niveles digitales para los píxeles correspondientes a los sitios de muestreo. Posteriormente, con el complemento XLSTAT de del software EXCEL se

determinó la relación entre los niveles digitales y los datos de campo, utilizando correlaciones de Pearson (variables continuas con distribución gaussiana) y Spearman (variables discretas o continuas con distribución libre); en ambos casos se fijó una significancia de 0.25 (75% de confiabilidad); además se determinó que valores superiores a 0.5 indicaban una correlación positiva y valores inferiores a -0.5 mostraban correlaciones negativas; lo anterior para determinar qué índice de percepción remota o composición RGB podría explicar la distribución espacial de nuestras variables en cada geoforma.

Una vez obtenidas las correlaciones, se procedió a identificar en cada geoforma la distribución de los píxeles con niveles digitales de índices de percepción remota y composiciones RGB coincidentes a los sitios de muestreo, para ello se hizo un proceso de extracción de píxeles por medio expresiones de inclusión y exclusión con los rangos correspondientes a los niveles digitales para cada índice y composición RGB de acuerdo a la variable de correlación en cada geoforma. Las expresiones que se utilizaron fueron:

- a) [Raster] <= ND
- b) [Raster] >= ND
- c) [Raster] < ND & [Raster] > ND
- d) [Raster] > ND & [Raster] < ND

Donde:

Raster = Índice o composición RGB por geoforma.

ND = Nivel digital de píxel.

Para la obtención de áreas asociadas a uso de suelo actual e inestabilidad de ladera, se requirió pasar los valores de todas las variables a escala de 0 a 1 a fin de hacer comparaciones entre ellas. Para determinar la pertenencia difusa que asigna un rango entre 0 y 1 para cualquier raster. Con esta herramienta se definió el tipo de pertenencia en función del impacto que pueda tener la variable para el uso de suelo o inestabilidad de ladera. Los tipos de pertenencia que se utilizaron en este estudio, se describen a continuación (ESRI, 2016):

- *Gaussiana*: Define la pertenencia difusa a través de una distribución gaussiana con un punto medio especificado por el usuario, los valores en torno a este punto se asignaran con una pertenencia cercana a 1 y el resto irán disminuyendo a cero.
- *Baja*: La pertenencia borrosa tomara a los valores más pequeños en una pertenencia más cerca de 1 y el resto se distribuirán hacia cero.

- *Alta*: Define a los valores más grandes en una pertenencia más cerca de 1 y el resto se distribuirán hacia cero.
- *Lineal*: Muestra a la pertenencia difusa a través de una transformación lineal, ubica a los valores mínimos con una pertenencia cercana a 0; y los valores máximos se observaran con pertenencia cercana a 1.

Finalmente, para cada geoforma se hizo una sobreposición difusa de las variables con el tipo de sobreposición *SUM*, ya que en este caso la combinación de variables es más importante que cualquier variable individual. La sobreposición de variables se realizó siguiendo el modelo teórico propuesto en este trabajo (Fig. 33).

*iv) Sobreposición difusa de variables asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo.*

En las variables discretas y variables continuas con distribución conocida (actividades agrícolas, actividades pecuarias, ocoteo, quema, ramoneo, riqueza, reforestación y tocones), no se requirió ningún procedimiento para darles una pertenencia difusa e ingresarlas al análisis de sobreposición difusa.

En el caso del arreglo espacial de las variables continuas con distribución desconocida, se consideraron las relaciones que existen entre factores bióticos y abióticos en los sitios con vegetación natural. Por ejemplo, en un escenario con áreas de vegetación natural conservada donde exista una alta abundancia, alta talla arbórea y una cobertura de hojarasca poco perturbada; se esperaría que el desarrollo del suelo mostrara de moderadas a altas concentraciones de bases intercambiables, humus, fósforo en materia orgánica y nitrógeno disponible; y valores de medios a altos en las características hídricas del suelo (cuanto agua disponible, aireación, capacidad de campo y volumen total de poros).

Dado lo anterior, si un índice de percepción remota o composición RGB resalta a la vegetación en pixeles brillantes, la correlación con éste debe ser positiva dado que a mayor brillantez hay más vegetación y por tanto la variable tendría una relación directamente proporcional; por ejemplo, si hay más brillantez hay más vegetación y por tanto más nitrógeno disponible. Por el contrario, si el índice de percepción remota o composición RGB otorga pixeles oscuros a la vegetación, la correlación con la variable tendría que ser negativa, ya que a menor brillantez hay más vegetación y la variable tendría una relación inversamente proporcional; que se traduciría en: si hay menos brillantez hay más nitrógeno disponible.

Los criterios anteriores también se utilizaron para las variables asociadas a inestabilidad de ladera, así, un sitio es más propenso a procesos gravitacionales cuando tiene una baja conductividad hidráulica, baja densidad aparente, alta erosionabilidad, baja estabilidad de agregados, profundidad de raíces alta y textura deleznable o más arenosa; lo cual ocurre regularmente en sitios con poca vegetación natural en donde los procesos erosivos son más frecuentes. Entonces, si un índice de percepción remota o composición RGB muestra a la vegetación en píxeles brillantes, la correlación tendría que ser negativa, ya que a menor brillantez hay menor vegetación y por ende habría más procesos gravitacionales; pero en el caso de que el índice de percepción remota o composición RGB resalte a la vegetación con píxeles oscuros, la correlación tendría que ser positiva porque a mayor brillantez se tendría menor vegetación y más procesos gravitacionales.

Siendo así, se observaron correlaciones negativas y positivas con una significancia (Valor P) menor a 0.25 entre los distintos índices de percepción remota y composiciones RGB y las variables de estudio, además se evidencio que un mismo un índice de percepción remota o composición RGB puede explicar diferentes variables para una misma geoforma; pero también una misma variable se puede explicar con diferentes índices de percepción remota o composiciones RGB en diferentes geoformas (Tabla 16).

**Tabla 16.** Correlaciones de Pearson y Spearman para determinar relaciones entre índices de percepción remota y composiciones RGB con variables de estudio.

Variable	MV				RPI				CL				RP			
	Índic e o RGB	C.C.	Valor P	T C	Índic e o RGB	C.C.	Valor P	T C	Índic e o RGB	C.C.	Valor P	T C	Índic e o RGB	C.C.	Valor P	T C
<b>AAr</b>	5	-0.55	0.133	S	11c	0.53	0.036	S	11a	-0.79	0.009	S	3	0.53	0.194	S
<b>BI</b>	11b	0.72	0.027	P	11b	0.57	0.164	P	7	-0.54	0.242	S	4	0.52	0.098	P
<b>dCC</b>	13	-0.55	0.213	S	3	0.53	0.229	P	2	0.55	0.099	P	11b	0.51	0.210	P
<b>CA</b>	7	-0.57	0.109	P	9	-0.54	0.221	S	7	-0.54	0.105	P	11b	0.54	0.174	P
<b>CC</b>	11c	0.63	0.067	P	9	-0.52	0.129	S	11c	0.54	0.234	P	4	0.52	0.103	P
<b>CHj</b>	2	0.55	0.175	P	8	0.54	0.202	S	10	0.68	0.032	P	16	-0.54	0.129	S
<b>CHum</b>	1	0.54	0.131	P	14	-0.54	0.218	P	6	0.76	0.016	P	11	-0.53	0.249	P
<b>Kf</b>	11c	-0.82	0.008	S	13	0.54	0.137	S	11	0.57	0.092	S	9	0.55	0.248	S
<b>DA</b>	14	0.55	0.133	S	11a	0.50	0.048	S	11b	-0.55	0.148	S	9	0.56	0.546	S
<b>K</b>	7	0.68	0.046	P	11	0.53	0.245	S	9	0.54	0.110	P	13	0.52	0.222	S
<b>EA</b>	11b	0.82	0.011	S	11c	0.52	0.245	S	13	0.79	0.009	S	6	0.52	0.233	P
<b>Pmo</b>	2	0.54	0.131	P	14	-0.53	0.215	P	11b	0.56	0.216	S	11	-0.53	0.248	P
<b>Nd</b>	5	-0.53	0.146	P	13	-0.53	0.217	P	14	-0.52	0.232	S	16	-0.52	0.241	P
<b>PR</b>	14	0.53	0.148	S	11	-0.53	0.245	P	9	0.70	0.023	P	11c	-0.53	0.241	P
<b>TAM</b>	11	-0.54	0.130	P	10	0.52	0.110	P	3	0.72	0.019	P	15	-0.87	0.004	P
<b>Tex</b>	9	0.61	0.083	P	7	0.51	0.119	P	11	0.51	0.245	P	11a	0.54	0.035	P
<b>VTP</b>	13	-0.58	0.102	P	10	0.52	0.233	P	8	0.56	0.074	P	10	0.54	0.240	P



**Tabla 16 (Continuación).** Correlaciones de Pearson y Spearman para determinar relaciones entre índices de percepción remota y composiciones RGB con variables de estudio.

Variable	CLSN				LB				LMC				LC			
	Índice o RGB	C.C.	Valor P	T C	Índice o RGB	C.C.	Valor P	T C	Índice o RGB	C.C.	Valor P	T C	Índice o RGB	C.C.	Valor P	T C
<b>AAr</b>	15	-0.64	0.096	S	1	0.53	0.241	S	14	-0.55	0.196	S	1	0.52	0.236	S
<b>BI</b>	11	-0.63	0.097	P	2	0.69	0.017	S	11	-0.52	0.119	S	11	-0.52	0.245	S
<b>dCC</b>	11c	0.51	0.240	P	11c	0.66	0.019	P	5	-0.52	0.121	P	11a	-0.51	0.053	P
<b>CA</b>	10	0.54	0.171	P	12	-0.54	0.246	P	2	0.56	0.034	S	11	-0.52	0.046	P
<b>CC</b>	13	-0.50	0.132	S	11	-0.56	0.246	P	2	0.64	0.013	S	11a	-0.55	0.036	P
<b>CHj</b>	12	-0.82	0.012	P	16	-0.53	0.232	P	5	-0.55	0.202	S	11a	-0.54	0.202	P
<b>CHum</b>	13	-0.66	0.074	P	11a	-0.52	0.237	P	1	0.71	0.003	P	11b	0.54	0.151	P
<b>Kf</b>	11c	-0.62	0.115	S	11c	0.51	0.092	P	1	0.54	0.210	S	5	-0.54	0.109	S
<b>DA</b>	2	-0.52	0.227	S	15	0.53	0.210	S	10	-0.57	0.030	S	2	-0.52	0.244	S
<b>K</b>	7	0.55	0.160	P	2	-0.53	0.075	P	12	0.51	0.248	S	9	0.60	0.018	P
<b>EA</b>	11b	-0.56	0.148	P	11a	0.53	0.217	P	11	-0.56	0.003	S	13	-0.52	0.245	S
<b>Pmo</b>	11	-0.59	0.122	P	3	0.52	0.249	S	3	0.62	0.013	P	2	0.55	0.197	S
<b>Nd</b>	11a	-0.59	0.122	P	3	0.53	0.239	S	3	0.74	0.002	P	9	-0.56	0.245	S
<b>PR</b>	7	0.51	0.202	P	7	0.53	0.164	P	4	-0.54	0.156	P	7	0.55	0.085	P
<b>TAM</b>	11a	-0.66	0.077	P	16	-0.55	0.133	P	4	0.53	0.233	P	7	-0.53	0.043	P
<b>Tex</b>	12	0.54	0.168	P	12	0.54	0.227	S	9	0.54	0.180	P	2	-0.51	0.052	P
<b>VTP</b>	13	-0.55	0.160	P	11b	0.55	0.244	S	6	0.52	0.050	S	11c	0.55	0.132	P

**AAr.** Abundancia arbórea. **BI.** Bases intercambiables. **dCC.** Capacidad de agua disponible. **CA.** Capacidad de aireación. **CC.** Capacidad de campo. **CHj.** Cobertura de hojarasca. **CHum.** Concentración de humus. **Kf.** Conductividad hidráulica. **DA.** Densidad aparente. **K.** Erosionabilidad. **EA.** Estabilidad de agregados. **Pmo.** Fósforo en materia orgánica. **Nd.** Nitrógeno disponible. **PR.** Profundidad de raíces. **TAM.** Talla arbórea máxima. **Tex.** Textura. **VTP.** Volumen total de poros. **MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno). **1.** Índice de vegetación de diferencia normalizada. **2.** Índice de vegetación diferenciada. **3.** Índice de vegetación mejorado. **4.** Índice de vegetación transformado de Thiam. **5.** Índice perpendicular de vegetación. **6.** Índice perpendicular de vegetación. **7.** Índice perpendicular de vegetación. **8.** Índice perpendicular de vegetación. **9.** Índice transformado de vegetación ajustado a suelo. **10.** Índice transformado de vegetación ajustado a suelo. **11.** Tasseled Cap. **11a** Brillo. **11b.** Verdor. **11c.** Humedad. **12.** RGB-465. **13.** RGB-653. **14.** RGB-654. **15.** RGB-753. **16.** RGB-763. **P:** Correlación de Pearson. **S:** Correlación de Spearman.

Posteriormente, se generaron las extracciones de píxeles para cada índice de percepción remota y composición RGB, de acuerdo a la variable en que se asoció, esto para obtener un raster para cada variable por geoforma. En este punto todas las variables analizadas para cambio de uso de suelo e inestabilidad de ladera, ya tuvieron una distribución conocida en cada geoforma y cada raster se sometió al proceso de pertenencia difusa (Tabla 17).

Tabla 17. Pertenencia difusa para cada variable de estudio.

Variables			CLASES DE PERTENENCIA								
			SN	LH	RP	RPI	MV	LB	LMC	LC	
Uso de suelo	Accesibilidad	Caminos	B	B	B	B	B	B	B	B	
		Pendiente	B	B	B	B	B	B	B	B	
	Fertilidad del suelo.	Estructura edáfica.	Capacidad de agua disponible	A	A	A	A	A	A	A	A
			Capacidad de aireación	A	A	A	A	A	A	A	A
			Capacidad de campo	A	A	A	A	A	A	A	A
			Volumen total de poros	G	G	G	G	G	G	G	G
			Bases intercambiables	A	A	A	A	A	A	A	A
	Calidad edáfica.	Fósforo en materia orgánica	A	A	A	A	A	A	A	A	
		Nitrógeno disponible	A	A	A	A	A	A	A	A	
		Concentración de humus	A	A	A	A	A	A	A	A	
		Riqueza arbórea	G	G	G	G	G	G	G	G	
	Prácticas forestales.	Recurso potencial arbóreo.	Abundancia arbórea	A	A	A	A	A	A	A	A
			Talla arbórea máxima	A	A	A	A	A	A	A	A
			Árboles ocoteados	A	A	A	A	A	A	A	A
		Aprovechamiento forestal.	Árboles quemados	A	A	A	A	A	A	A	A
			Árboles ramoneados	A	A	A	A	A	A	A	A
			Tocones de árboles	A	A	A	A	A	A	A	A
			Actividades agrícolas	L	L	L	L	L	L	L	L
		Intervención forestal.	Actividades pecuarias	L	L	L	L	L	L	L	L
			Cobertura de hojarasca	B	B	B	B	B	B	B	B
Reforestación			L	L	L	L	L	L	L	L	
Inestabilidad de ladera		Relieve	Pendiente	A	A	A	A	A	A	A	A
			Orientación de ladera	B	B	B	B	B	B	B	B
	Red hídrica		B	B	B	B	B	B	B	B	
	Distancia a procesos gravitacionales		B	B	B	B	B	B	B	B	
	Protección al relieve		B	B	B	B	B	B	B	B	
	Estructura del suelo	Conductividad hidráulica	B	B	B	B	B	B	B	B	
		Densidad aparente	B	B	B	B	B	B	B	B	
		Erosionabilidad	A	A	A	A	A	A	A	A	
		Estabilidad de agregados	B	B	B	B	B	B	B	B	
		Profundidad de raíces	A	A	A	A	A	A	A	A	
		Textura	A	A	A	A	A	A	A	A	

A: Alta. B: Baja. L: Lineal. G: Gaussiana

Para determinar el tipo de pertenencia difusa, se consideró el impacto que tendría cada variable para definir zonas asociadas a cambio de uso de suelo agrícola o inestabilidad de ladera, siendo así, la pertenencia difusa para cada variable se explica de la siguiente forma:

- **Variables asociadas a uso de suelo.**

- *Accesibilidad.* Este rubro considera a las variables caminos y pendiente, en ambos casos se otorgó una pertenencia difusa baja, ya que en los caminos se consideró que las áreas más cercanas a estos, están más asociadas a cambios de uso de suelo; y en la pendiente, se partió

de que los campos agrícolas son más comunes en pendientes menores 30°, así las áreas con estas pendientes están más asociadas a un cambio uso de suelo.

- *Estructura del suelo.* En este conjunto de variables se toman la capacidad de agua disponible, capacidad de aireación y capacidad de campo con pertenencia difusa alta, ya que los suelos con más agua disponible, buena aireación y buena retención del agua son más atractivos a cambios de uso de suelo agrícolas. En tanto que en el volumen total de poros se considera una pertenencia difusa gaussiana, debido a que los suelos más propensos a cambio de uso de suelo agrícola son aquellos que presentan valores cercanos a la media, es decir ni con pocos poros que favorezcan la anegación ni con muchos poros que lixivien los nutrimentos y no retengan agua.
- *Calidad del suelo.* Un suelo bien nutrido es más propenso a tener un cambio de uso de suelo agrícola, es por ello que a las variables bases intercambiables, fósforo en materia orgánica, nitrógeno disponible y concentración de humus se les aplicó una pertenencia alta.
- *Recurso potencial arbóreo.* Las variables abundancia y talla arbórea se tomaron con pertenencia alta, ya que los sitios con valores altos en abundancia y con individuos arbóreos altos son más propensos a la tala ilegal y por ende un cambio de uso de suelo forestal, y si la deforestación se hace intensiva puede derivar a un cambio de uso de suelo agrícola al haber sido removida toda la cubierta arbórea.
- *Aprovechamiento forestal.* En la riqueza arbórea se aplicó una pertenencia gaussiana, debido a que no es claro si el número de especies de árboles determina que sitios son más propensos a tala, queda claro que los sitios con más especies de coníferas serán más propensos a la deforestación por tener más individuos maderables, pero la diversidad de especies cambia entre un sitio y otro; incluyendo a especies no maderables.
- *Intervención forestal.* Los sitios con mayor impacto por tala ilegal o deforestación serán más propensos a cambios de uso de suelo agrícolas, es por ello que se consideró a las variables árboles ocoteados, árboles quemados, árboles ramoneados y tocones de árboles con pertenencia alta.
- *Intervención forestal.* Las actividades agrícolas, pecuarias y de reforestación se evaluaron en función de su presencia o ausencia en los sitios de estudio, es por ello que se tomó una pertenencia lineal; ya que su presencia causa un impacto en la vegetación natural, y si estas a la larga son más intensivas y extensivas pueden conducir a un cambio de uso de suelo agrícola. La cobertura de hojarasca indica que tan perturbado se encuentra un sitio, así que

se aplicó una pertenencia baja, ya que los sitios con menos hojarasca son tienen más perturbación y con ello más propensos a cambios de uso de suelo agrícola.

- **Variables asociadas a inestabilidad de ladera.**

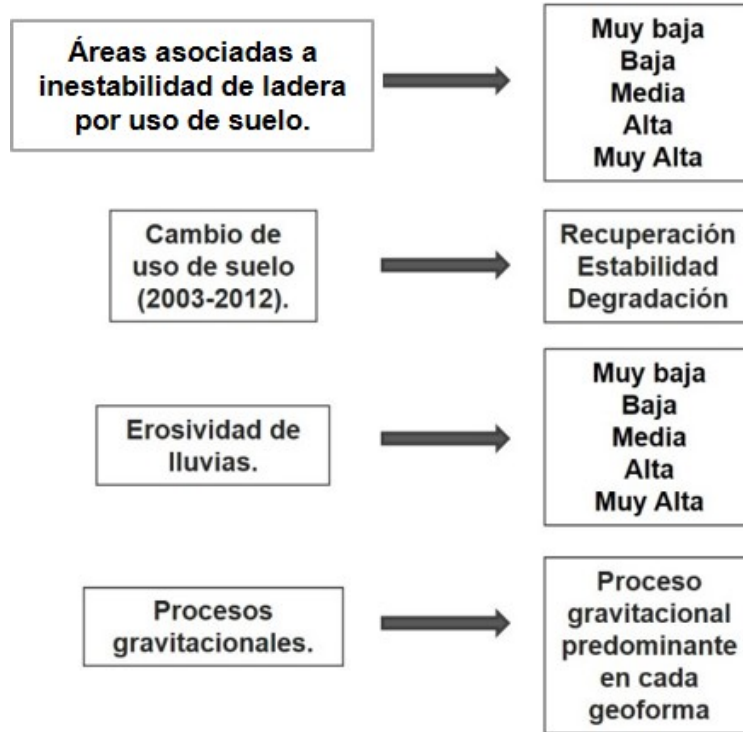
- *Relieve.* Para la variable pendiente se consideró que las áreas con mayor inclinación están más asociadas a procesos gravitacionales, y por ende a esta variable se le otorgo una pertenencia alta. Para la orientación de ladera, los valores bajos en el raster corresponden a orientaciones norte y por ello se aplicó una pertenencia baja. En el resto de las variables se observa que las áreas con menor distancia a cauces en la red hídrica, menor distancia a procesos gravitacionales y menor protección al relieve están más asociadas a procesos gravitacionales, siendo así se consideró una pertenencia baja.
- *Estructura del suelo.* Las áreas más asociadas a procesos gravitacionales son aquellas que tienen baja conductividad hidráulica, baja densidad aparente y baja estabilidad de agregados, es por ello que se les dio una pertenencia baja. En tanto que para el resto de las variables se les aplico una pertenencia alta, para localizar las áreas con más erosionabilidad, más profundidad de raíces y más textura arenosa.

Una vez que se tuvieron todas las variables en la misma escala, se procedió a la sobreposición difusa siguiendo el modelo teórico propuesto en este estudio

### **2.2.3 Susceptibilidad a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo**

Para determinar la susceptibilidad a inestabilidad de laderas por cambio de uso de suelo en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto se consideraron a las variables cartográficas (cambio de cobertura vegetal (2003 y 2012), procesos gravitacionales (1994-2012), erosividad por lluvias (1968-1989) y áreas asociadas con la inestabilidad ladera por cambio de uso de suelo actual (2012)); considerando como susceptibilidad a la posibilidad de que ocurra un proceso gravitacional. Dado lo anterior, se partió de una evaluación multicriterio (Saaty, 2008), que permite ordenar las variables (variables cartográficas) en una estructura jerárquica, a la que posteriormente se le asignan pesos de ponderación utilizando los datos de áreas de incidencia de las variables y conocimiento experto, lo anterior para encontrar sitios susceptibles a procesos gravitacionales (Abarca y Quiroz, 2005; Roa, 2007; Marcano et al., 2015).

Como primer paso se procedió a establecer clases de intensidad para cada variable cartográfica con el propósito de constituir una jerarquía al interior de cada una de ellas; lo anterior en función de su contribución para la formación de nuevos procesos gravitacionales (Fig. 31).



**Figura 31.** Clases de intensidad para variable cartográfica en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

En el segundo paso se realizaron matrices de jerarquización analítica (Roa, 2007) para cada geoforma, utilizando las clases de intensidad de cada variable cartográfica para obtener sus distintos pesos relativos en función de su contribución para la formación de nuevos procesos gravitacionales (Tabla 18).

**Tabla 18.** Matrices de jerarquización analítica para pesos de clases de intensidad por variable cartográfica.

Áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo	Muy alta (1)	Alta (0.80)	Media (0.60)	Baja (0.40)	Muy baja (0.20)	$\Sigma_{xj}/n$	Peso relativo $(\Sigma xj/n)/\Sigma(\Sigma xj/n)$
Muy alta (1)	1						
Alta (0.80)		1					
Media (0.60)			1				
Baja (0.40)				1			
Muy baja (0.20)					1		
						$\Sigma(\Sigma xj/n)$	

Cambio de uso de suelo 2003-2012	Degradación	Recuperación	Estabilidad	$\Sigma_{xj}/n$	Peso relativo $(\Sigma xj/n)/\Sigma(\Sigma xj/n)$
Degradación	1				
Recuperación		1			
Estabilidad			1		
				$\Sigma(\Sigma xj/n)$	

Procesos gravitacionales	D. Somero	Caída de rocas	Flujos de escombros	D. Asentamiento profundo	D. Escombros	Flujos de tierra	$\Sigma_{xj}/n$	Peso relativo $(\Sigma xj/n)/\Sigma(\Sigma xj/n)$
D. Somero	1							
Caída de rocas		1						
Flujos de escombros			1					
D. Asentamiento profundo				1				
D. Escombros					1			
Flujos de tierra						1		
							$\Sigma(\Sigma xj/n)$	

Erosividad de lluvias.	Baja	Muy baja	Media	Alta	Muy alta	$\Sigma_{xj}/n$	Peso relativo $(\Sigma xj/n)/\Sigma(\Sigma xj/n)$
Baja	1						
Muy baja		1					
Media			1				
Alta				1			
Muy alta					1		
						$\Sigma(\Sigma xj/n)$	

Para la asignación de valores en la matriz de jerarquización analítica se partió de la escala de valoración de Roa, 2007, la cual utiliza una calificación o cuantificación de pares de concordancia siguiendo una comparación de dos variables en función de la afectación o contribución que pueda tener para la formación de procesos gravitacionales (Tabla 19).

**Tabla 19.** Parámetros de pares de concordancia para la evaluación de la matriz jerarquización analítica (Modificada de Roa, 2007).

Nivel	Definición	Descripción
1	Igual preferencia	Los criterios (x, j) contribuyen de igual manera en los procesos de deslizamiento.
2	Moderada preferencia	Pasadas experiencias favorecen ligeramente al criterio (x) sobre el otro (j).
3	Fuerte preferencia	Prácticamente la dominancia del criterio (x) sobre el otro (j) está demostrada.
4	Absoluta preferencia	Existe evidencia que determina la supremacía del criterio (x).

En el tercer paso se consideraron las superficies para clase de intensidad en cada variable cartográfica y la superficie afectada por procesos gravitacionales, con la finalidad de obtener en cada variable cartográfica de cada geoforma, el peso por unidad en porcentaje y el grado de susceptibilidad a partir del peso relativo (Tabla 20).

**Tabla 20.** Grados de susceptibilidad en cada clase de intensidad por variable.

Áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo.	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy alta (1)							
Alta (0.80)							
Media (0.60)							
Baja (0.40)							
Muy baja (0.20)							

Cambio de uso de suelo 2003-2012.	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Degradación							
Recuperación							
Estabilidad							

Procesos gravitacionales.	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Caída de rocas							
D. Asentamiento profundo							
D. Escombros							
D. Somero							
Flujos de escombros							
Flujos de tierra							

Erosividad de lluvias.	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy baja							
Baja							
Media							
Alta							
Muy alta							

Una vez obtenido el grado de susceptibilidad, el cuarto paso fue la reclasificación de las variables cartográficas; lo anterior se realizó para definir la susceptibilidad espacial por clase de intensidad en cada variable cartográfica por geoforma.

Con el proceso anterior se obtuvieron los pesos relativos de la susceptibilidad a procesos gravitacionales para las clases de intensidad de cada variable cartográfica por geoforma, y para conocer los pesos relativos de la susceptibilidad a procesos gravitacionales derivada de cada variable cartográfica (áreas asociadas a inestabilidad de laderas por uso de suelo actual, el cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012, los procesos gravitacionales entre 1994 y 2012, y la erosividad de lluvias), se repitieron el segundo y tercer paso en cada una de ellas. En este proceso se evaluó la influencia de cada variable cartográfica para generar nuevos procesos gravitacionales por geoforma (Tabla 21).

**Tabla 21.** Matriz de jerarquización analítica y grados de susceptibilidad para variable.

Variable cartográfica	LMC	LC	RPI	LB	MV	CL	RP	CLSN	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo $(\Sigma x_j/n)/\Sigma(\Sigma x_j/n)$
LMC	1									
LC		1								
RPI			1							
LB				1						
MV					1					
CL						1				
RP							1			
CLSN								1		
								$\Sigma(\Sigma x_j/n)$		

Variable cartográfica	Superficie geoforma	Superficie variable	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
MV							
RPI							
CL							
RP							
CLSN							
LB							
LMC							
LC							

**MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

Una vez obtenidos los pesos de ponderación para cada variable cartográfica, se realizó una suma lineal ponderada en cada geoforma para determinar la susceptibilidad a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo; y la ecuación se construyó de la siguiente forma:

$$\text{Susceptibilidad por geoforma} = [AP*P]+[CU*P]+ [PG*P]+[E*P]$$



Donde:

**AP** = Áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual (2012).

**CU** = Cambio de uso de suelo (2003 y 2012).

**PG** = Incidencia de procesos gravitacionales (1994-2012).

**E** = Erosividad de lluvias (1968-1989).

**P** = Ponderación.

Los raster resultantes de la suma lineal ponderada por geoforma se fusionaron en uno; y finalmente, el mosaico obtenido se reclasificó para categorizar la susceptibilidad de muy baja a muy alta.

## 2.2.4 Evaluación de la confiabilidad del mapa de susceptibilidad

Para realizar la validación del mapa de áreas susceptibles a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo, se recurrió a un análisis de la confiabilidad por medio de una matriz de error con diseño de muestreo estratificado y aleatorio, el cual está basado en las clases de susceptibilidad por geoforma. Este análisis parte del hecho de que no todas las clases de susceptibilidad tienen el mismo tamaño de superficie en cada geoforma; por lo que para determinar la confiabilidad del mapa se recurrió a los criterios de evaluación de la confiabilidad en un mapa temático propuestos por Card, 1982 y sintetizados por Mas et al., 2014.

Se consideraron 400 puntos para integrar la matriz de error de todo el mapa, posteriormente se realizó una tabla en la que se parte de la superficie que obtuvo cada clase de susceptibilidad (muy baja, baja, media, alta y muy alta) para calcular los porcentajes que representan cada clase respecto a la suma de todas ellas; y tomando en cuenta estos porcentajes, se calculó el número de puntos de validación que debía tener cada clase de susceptibilidad, así como la proporción de área validada que cubren los puntos de validación y la relación de puntos de validación por área validada (Tabla 22).

**Tabla 22.** Ejemplo de tabla para validación por clase de susceptibilidad (Mas et al., 2014).

Clases de susceptibilidad	Superficie	Superficie (%)	Proporción de puntos de validación	Puntos de validación	Proporción de área validada (%)	Relación de puntos de validación por área validada.
Muy baja						
Baja						
Media						
Alta						
Muy alta						
Total						

Para la proporción de puntos de validación se utilizó la siguiente fórmula (Card, 1982):

$$PVCS = \frac{(TPV)*(\% ACS)}{100}$$

Donde:

PVCS = Proporción de puntos de validación por clase de susceptibilidad.

TPV = Total de puntos de validación.

ACS = Área por clase de susceptibilidad.

En el caso de la proporción de área validada la expresión fue la siguiente (Card, 1982):

$$PrAV = \frac{PVC}{TPV} * 100$$

Donde:

PrAV = Proporción de área validada.

PVC = Puntos de validación por clase.

TPV = Total de puntos de validación.

Y la relación de puntos de validación por área validada, fue resuelta con esta fórmula (Card, 1982):

$$RPVAV = \frac{PrAV}{Superficie (\%)}$$

Donde:

RPVAV = Relación de puntos de validación por área validada.

PrAV = Proporción de área validada.

Una vez obtenidos los puntos de validación por clases de susceptibilidad, se realizó el mismo proceso para determinar los puntos de validación de cada clase de susceptibilidad pero para cada geoforma (Tabla 23).

**Tabla 23.** Ejemplo de tabla para puntos de muestreo para validación de susceptibilidad por geoforma.

Geoforma	Clases de susceptibilidad	Superficie	Superficie (%)	Proporción de puntos de validación	Puntos de validación	Proporción de área validada (%)	Relación de puntos de validación por área validada.
<b>MV</b>	Muy baja						
<b>RPI</b>	Muy baja						
<b>CL</b>	Muy baja						
<b>RP</b>	Muy baja						
<b>CLSN</b>	Muy baja						
<b>LB</b>	Muy baja						
<b>LMC</b>	Muy baja						
<b>LC</b>	Muy baja						
<b>Total</b>							

Con los puntos determinados para cada clase de susceptibilidad por geoforma, se creó un archivo vectorial de puntos al azar para establecer la ubicación de los puntos de verificación aleatorios dentro de cada clase de susceptibilidad por geoforma. A partir de estos puntos se ubicó el pixel de

sobreposición con un tamaño de 10 x 10 m (una hectárea) en el mapa de áreas susceptibles a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo. A partir de estos puntos se realizó una verificación en campo a partir de las clases de susceptibilidad, misma que se basó en la búsqueda de indicadores de inestabilidad de pendiente, así como en la presencia o ausencia de cambios en la cobertura vegetal de los sitios evaluados (Tabla 24).

**Tabla 24.** Indicadores de verificación para evaluar susceptibilidad (Basado en Alcántara et al., 2008).

Susceptibilidad	Indicadores
Muy baja	Ausencia de evidencia de procesos de inestabilidad de ladera. Ausencia de deforestación.
Baja	Presencia de erosión laminar y/o surcos. Presencia de deforestación.
Media	Presencia de erosión laminar, surcos y cárcavas. Presencia de procesos de reptación (terracetas, inclinación o curvatura en troncos de árboles, postes o cercas). Presencia de daños infraestructurales (fisuras en pavimento). Presencia de deforestación.
Alta	Presencia de erosión laminar, surcos y cárcavas. Presencia de procesos de reptación (terracetas, rodamiento de bloques superficiales, inclinación o curvatura en troncos de árboles postes o cercas). Presencia de daños infraestructurales (fisuras, grietas o deformaciones en pavimento). Presencia de procesos gravitacionales inactivos. Presencia de deforestación o sobrerreforestación.
Muy Alta	Presencia de erosión laminar, surcos y cárcavas. Presencia de procesos de reptación (terracetas, rodamiento de bloques superficiales, inclinación o curvatura en troncos de árboles postes o cercas). Presencia de daños infraestructurales (fisuras, grietas, deformaciones y ruptura en pavimento). Presencia de escarpes o escalonamientos. Presencia de procesos gravitacionales activos e inactivos. Presencia de deforestación o sobrerreforestación.

Con los datos obtenidos de la verificación en campo, se cuantificaron los errores de omisión y la precisión del productor (pixeles de una clase que no fueron ubicados en ella), así como los errores de comisión y la precisión del usuario (pixeles clasificados en una clase a la que no pertenecen); y a partir de estos resultados se estableció una matriz de error (Tabla 25).

**Tabla 25.** Ejemplo de matriz de error para clases de susceptibilidad.

	Mapa						Total Fila	Error comisión	Confiability productor
	Clases de susceptibilidad	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta			
Referencia	Muy baja	$P_{ij}$	$P_j$	...	...	...	$\Sigma(P_{ij}+P_j+...)$	$\frac{1-P_{ij}}{\Sigma(P_{ij}+P_j+...)}$	$P_{ij}/\Sigma(P_{ij}+P_j+...)$
	Baja	$P_i$	...						
	Media	⋮		...					
	Alta	⋮			...				
	Muy alta	⋮				...			
	Total columna	$\Sigma(P_{ij}+P_i+...)$						Precisión global	$\Sigma(p_{ij}+...)/n$
	Error omisión	$\frac{1-P_{ij}}{\Sigma(P_{ij}+P_i+...)}$							
Confiability usuario	$P_{ij}/\Sigma(P_{ij}+P_i+...)$								

No obstante, debido al posible submuestreo o sobremuestreo derivado de la asignación de puntos de validación en algunas clases, se realizó una corrección a la matriz de error utilizando la proporción de área validada por puntos de verificación correctos, con errores de omisión y con errores de comisión. Además, para darle mayor peso a los resultados, se procedió a calcular los intervalos de confianza de para la confiabilidad global, confiabilidad del usuario y confiabilidad del productor; para ello se utilizaron las siguientes formulas (Card, 1982):

$$HCl_{\delta} = z \sqrt{\sum_{i=1}^q \hat{P}_{ii} \frac{\pi_i - \hat{P}_{ii}}{n_{i+}}}$$

Donde:

$HCl_{\delta}$  = Intervalo de confiabilidad Global.

$z$  = Percentil de la distribución normal para intervalo de 95% de confianza ( $z=1.96$ ).

$\hat{P}_{ii}$  = Valores en la diagonal.

$\pi_i$  = El total en la columna.

$n_{i+}$  = Número de puntos de validación en cada clase  $i$ .

$$HCl_{\hat{u}i} = z \sqrt{\frac{\hat{P}_{ii} (\pi_i - \hat{P}_{ii})}{\pi_i^2 n_{i+}}}$$

Donde:

$HCl_{\hat{u}i}$  = Intervalo de confiabilidad del usuario.

$$HCl_{\hat{p}j} = z \left( \hat{P}_{jj} \hat{P}_{+j}^{-4} \left[ \hat{P}_{jj} \left( \sum_{i+j}^q \frac{\hat{P}_{ij} (\pi_i - \hat{P}_{ij})}{n_{i+}} \right) + \frac{(\pi_j - \hat{P}_{jj})(\hat{P}_{+j} - \hat{P}_{jj})^2}{n_{j+}} \right] \right)^{1/2}$$

Donde:

$HCl_{\hat{p}j}$  = Intervalo de confianza del productor.

$\hat{P}_{jj}$  = Valor en la diagonal.

$\hat{P}_{+j}$  = Total en la fila

$\hat{P}_{jj}$  = Errores de comisión.

$\pi_j$  = Total en la fila

$n_{j+}$  = Número de puntos de validación en cada clase  $j$ .

### **3. Resultados**

Dado que los análisis de este trabajo fueron extensos, a continuación, se muestran los principales resultados del mapa de geoformas, de cada una de las variables cartográficas, del mapa susceptibilidad a procesos gravitacionales por cambios de uso de suelo y de la confiabilidad del mismo.

#### **3.1 Evaluación del relieve al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto**

De forma general en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto se observaron estructuras asociadas tanto a depósitos volcánicos como a depósitos sedimentarios, por lo ello fue necesario identificar la diversidad de formas del relieve al interior de la subcuenca. Para ello se recurrió a una evaluación morfométrica que indicó los cambios más evidentes en la estructura del relieve y la descripción de cada una de las geoformas.

##### **3.1.1 Morfometría de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto**

###### *i) Altimetría.*

La subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto posee un rango altitudinal que va desde los 1280 a los 5675m s. n. m., en este mapa y con ayuda de perfiles topográficos son perceptibles de forma general algunas formas del relieve como son planicie, piedemonte, montañas, rampas extendidas y laderas de los edificios volcánicos (Fig. 32).

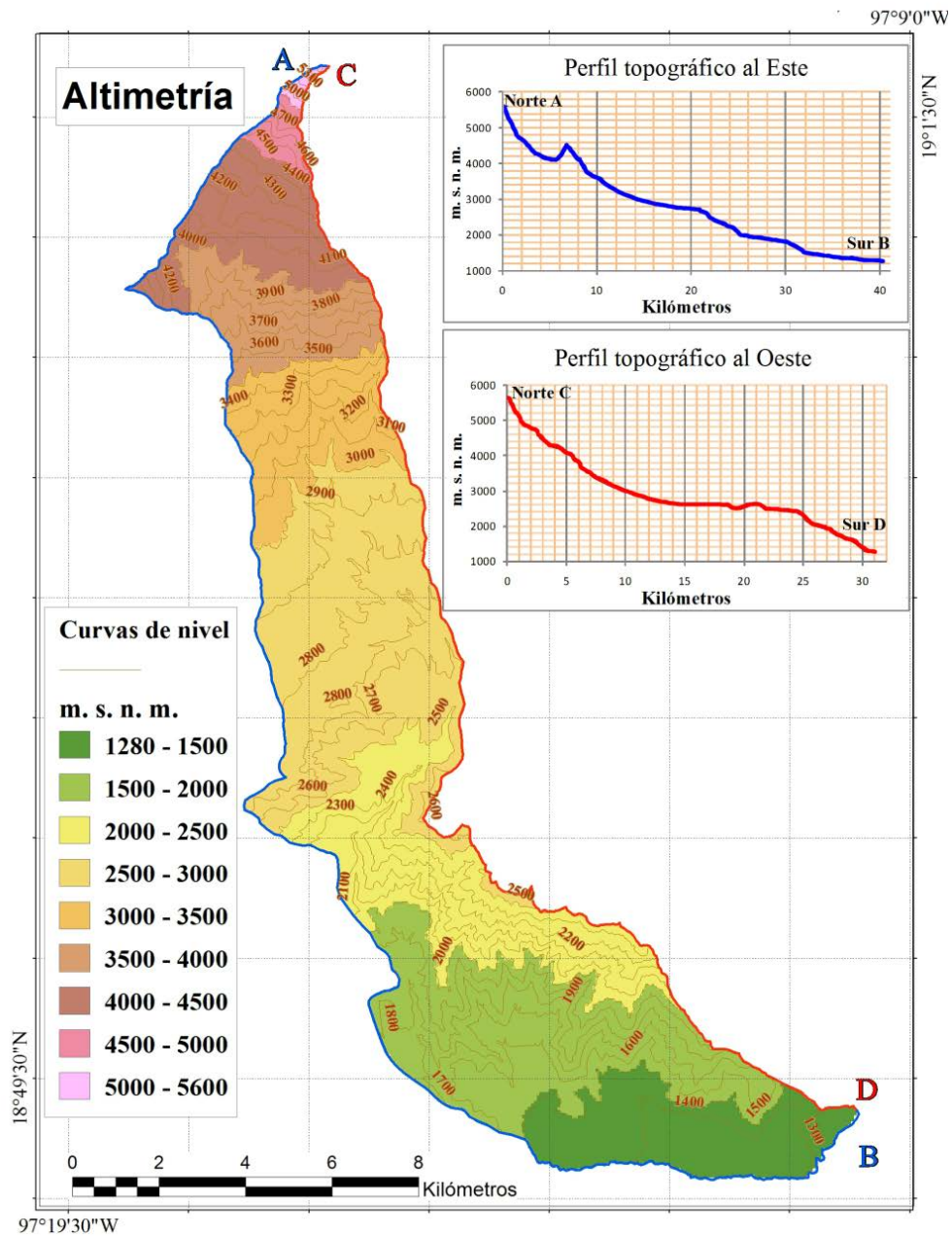


Figura 32. Mapa altimétrico de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

a) *Planicie*. Se localiza de los 1280 a los 1400 m s. n. m. en la región sur de la subcuenca entre los kilómetros 32 y 40 del perfil topográfico al oeste (Fig. 32). Por ella fluyen aguas que provienen de la parte alta de la subcuenca, así como los ríos Maltrata y Río Blanco, los cuales con su distribución meándrica ponen en evidencia una pendiente suavizada; situación que ha permitido la continua urbanización en las poblaciones Ciudad Mendoza y Nogales.

*b) Piedemonte.* Corresponde a un rango altitudinal de 1400 a 2200 m s. n. m. al suroeste de la subcuenca entre los kilómetros 26 y 32 del perfil topográfico al oeste (Fig. 32). Es una superficie que por definición tiene como contacto los márgenes de las montañas y las zonas de planicie (Lugo-Hubp, 2011), en temporada de lluvias por el cursan aguas provenientes de la parte alta de la subcuenca y de las montañas que lo delimitan al noreste.

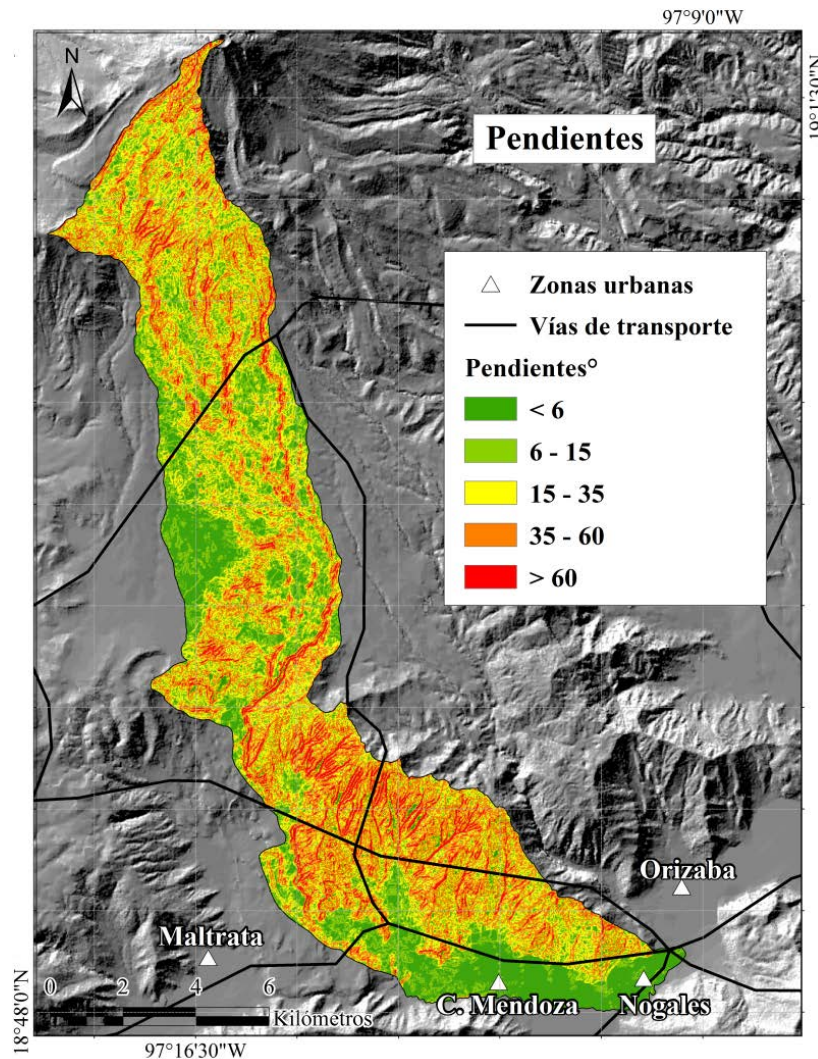
*c) Montañas.* Ubicadas de los 2000 a los 2600 m s. n. m. al sureste de la subcuenca entre los kilómetros 20 y 30 del perfil topográfico al este (Fig. 32). Representan un conjunto de elevaciones de 600 m respecto a las regiones de planicie y piedemonte, con un origen sedimentario de acuerdo a la carta Geológica-Minera (SGM, 2000).

*d) Rampas extendidas.* Se encuentran en un rango de 2800 a 4000 m s. n. m. sobre depósitos volcánicos de la parte central de la subcuenca. Es una región extensa con una distribución de 11 km de longitud en el perfil topográfico al oeste y de 16 km en el perfil este (Fig. 32).

*e) Laderas de edificios volcánicos.* Situadas entre los 4000 y 4621 m s. n. m. en el caso del Volcán Sierra Negra y 5675 m s. n. m. para el Pico de Orizaba, su longitud no va más allá de los 5 km de acuerdo con los perfiles topográficos (Fig. 32).

*ii) Pendientes.*

El mapa de pendientes representa la inclinación de una superficie en grados y permite resaltar laderas o zonas de barrancos al tener la visualización de ángulos y profundidades en el relieve, en el caso de este trabajo dicho mapa brinda información útil para la identificación de zonas potenciales a procesos de remoción en masa, la cual es la base para la elaboración de un mapa de peligros por deslizamiento y cambio de uso de suelo. Siendo así, en el mapa de pendientes de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto se establecieron 5 rangos (Fig. 33), los cuales permiten la identificación de distintos elementos del relieve como son piedemonte extendido ( $< 6^\circ$ ), rampa ( $6-15^\circ$ ), laderas medias ( $15-35$ ), laderas abruptas ( $35-60^\circ$ ) y laderas escarpadas o valles profundos ( $> 60$ ) (Lugo-Hubp, 2011).



**Figura 33.** Mapa de pendientes de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

A continuación, se describen los elementos del relieve que se identificaron de acuerdo a la pendiente y su relación con procesos gravitacionales descritos por Legorreta et al., 2014:

**a) Piedemonte extendido.** Se ubica al sur de la subcuenca con una pendiente menor a  $6^\circ$  (Fig. 33), si bien esta región en el mapa altimétrico se clasificó como planicie por la inclinación correspondería más a un piedemonte, que en este caso al tener una longitud mayor a 8 km se le agrega el calificativo de extendido. En esta zona los procesos de remoción en masa se limitan a eventos de deslizamientos someros superficiales.

**b) Rampa.** Posee un rango de 6 a  $15^\circ$  de inclinación, al interior de la subcuenca se observan dos grandes regiones una al suroeste de la subcuenca y otra en la porción central (Fig. 33). La primera



corresponde a depósitos de acumulación, en tanto que la segunda se relaciona con depósitos volcánicos; en ambas áreas se observó la presencia de procesos de reptación e incluso un flujo de escombros asociado al cambio de uso de suelo al comenzar dentro de un campo agrícola.

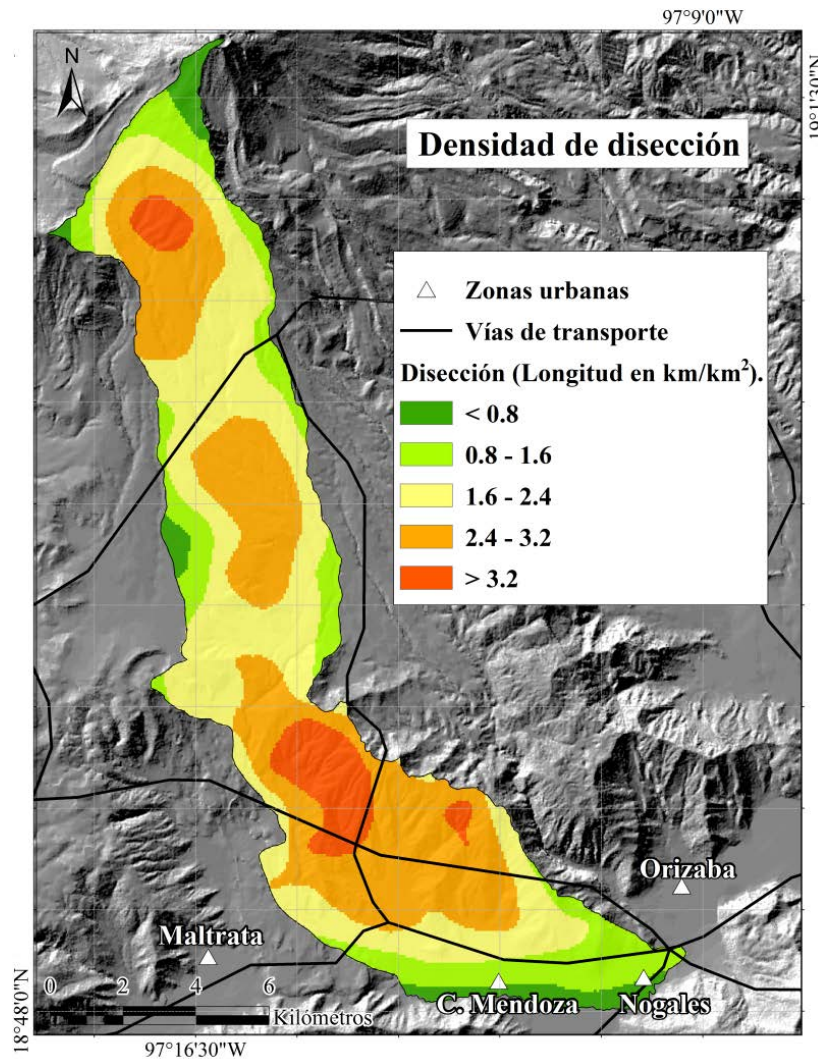
*c) Laderas extendidas.* Son áreas con una pendiente de entre 15 y 35° y se distribuyen en casi toda la subcuenca (Fig. 33). No obstante, tienen una representación más homogénea y de amplia extensión en las montañas de origen sedimentario. Esas zonas son propensas a presentar procesos de deslizamientos someros superficiales y caídas de bloques.

*d) Laderas abruptas.* Se refiere a zonas con inclinaciones de entre 35 y 60° ubicadas en regiones cercanas a barrancos y laderas escarpadas en toda la subcuenca (Fig. 33). En ellas se muestran procesos gravitacionales de tipo de deslizamientos (asentamiento profundo, someros superficiales y escombros), flujos (de tierra y escombros) y caídas de bloques.

*e) Laderas escarpadas y valles profundos.* Poseen una pendiente mayor a 60°, su distribución es mayor en superficies de alta montaña y barrancos de las regiones baja (depósitos sedimentarios) y alta (depósitos volcánicos) de la subcuenca (Fig. 33). Son áreas que presentan eventos de deslizamientos y flujos de escombros, así como desprendimientos de rocas.

### ***iii) Densidad de disección.***

Dada la geología, la altimetría, la distribución de pendientes y su orientación respecto al Golfo de México, se puede inferir que la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto posee una alta incidencia de procesos fluviales erosivos, los cuales se acentúan en la temporada de lluvias. Es por ello que se realizó un mapa de densidad de disección, donde se representa cuál es la intensidad de erosión con base a la longitud que ocupan los valles fluviales por kilómetro cuadrado de la subcuenca (Lugo-Hubp, 1991). Dado lo anterior, con base a los valores extremos que se obtuvieron se generaron cinco rangos: densidad baja ( $< 0.8 \text{ km/km}^2$ ), densidad media-baja ( $0.8\text{-}1.6 \text{ km/km}^2$ ), densidad media ( $1.6\text{-}2.4 \text{ km/km}^2$ ), densidad media-alta ( $2.4\text{-}3.2 \text{ km/km}^2$ ) y densidad alta ( $> 3.2 \text{ km/km}^2$ ), los cuales en apariencia se distribuyen independiente de las formas del relieve (Fig. 34).



**Figura 34.** Mapa de densidad de disección de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

*a) Densidad baja (< 0.8 km/km<sup>2</sup>).* Se distribuye en dos forma del relieve prácticamente opuestas (Fig. 34), por un lado se presenta áreas de baja pendiente como el piedemonte (< 6°) y la rampa (6-15°), donde los procesos fluviales se ven limitados por el poco movimiento que otorga una pobre inclinación; y por el otro en las cumbres de los edificios volcánicos, donde no hay cauces definidos pero si existe una alta pendiente (35-60°) que sumada a los procesos glaciales comunes en alta montaña favorece la incidencia de erosión fluvial.

*b) Densidad media-baja (0.8-1.6 km/km<sup>2</sup>).* Al igual que el rango anterior, este se ubica en áreas del piedemonte (<6°), rampa (6-15°) y laderas de edificios volcánicos (15-60°) (Fig. 34), con la

diferencia de ser zonas con cauces definidos, pero al tener poca densidad la erosión fluvial se ve limitada.

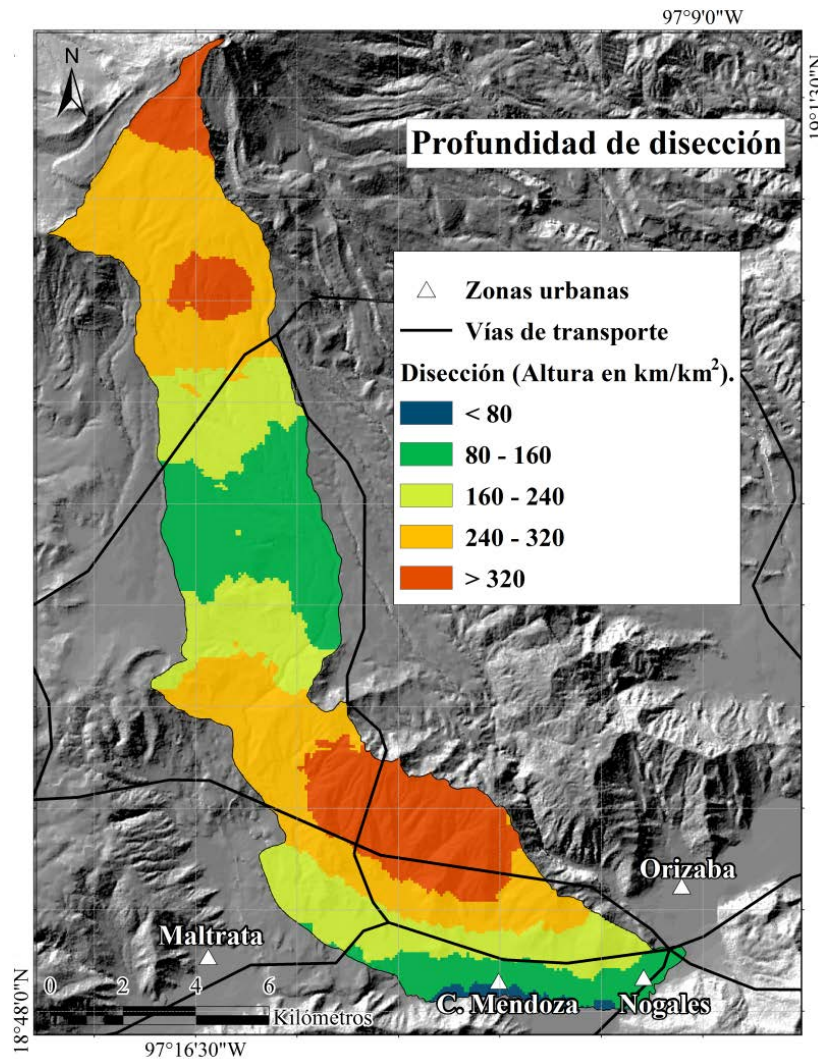
*c) Densidad media (1.6-2.4 km/km<sup>2</sup>).* Este rango se extiende en zonas de piedemonte (<6°), rampa (6-15°) y laderas de edificios volcánicos (15-60°), los depósitos geológicos donde predomina son los de origen volcánico en los que se observan cauces definidos pero de poca profundidad (Fig. 34).

*d) Densidad media-alta (2.4-3.2 km/km<sup>2</sup>).* Se localiza principalmente en las regiones de rampa (6-15°) en depósitos volcánicos donde se presenta la intersección de cauces principales y secundarios, y también en laderas de montañas (15-60°) que por su origen sedimentario favorecen los procesos de erosión fluvial que conllevan a la disección del relieve (Fig. 34).

*e) Densidad alta (> 3.2 km/km<sup>2</sup>).* No tiene una amplia distribución en la subcuenca pero se ubica en áreas estratégicas con pendientes mayores a 60° como son las cabeceras de barrancos (Fig. 34) con patrón dendrítico en depósitos volcánicos y sedimentarios, y también en redes fluviales paralelas en depósitos sedimentarios.

*iv) **Profundidad de disección.***

Conocer la profundidad de los cauces y la variabilidad de contactos litológicos (SGM, 2000) es necesario para identificar áreas donde los procesos de remoción en masa pueden tener mayores dimensiones y por tanto mayor acarreo de materiales durante la temporada de lluvias. Es por ello que se realizó un mapa de profundidad de disección por kilómetro cuadrado con cinco rangos generados a partir de los datos extremos: baja (< 80m), media-baja (80-160m), media (160-240m), media-alta (240-320m) y alta (> 320m); que al igual que la densidad de disección no se correlaciona fielmente a las formas del relieve (Fig. 35).



**Figura 35.** Mapa de profundidad de disección en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

*a) Profundidad baja (< 80m).* Se localiza en una pequeña área al sur de subcuenca sobre depósitos de acumulación en un piedemonte (< 6°) (Fig. 35).

*b) Profundidad media-baja (80-160m).* Presente en una zona de piedemonte (< 6°) en depósitos de acumulación al sur de la subcuenca y en un área de rampa (6-15°) en depósitos volcánicos (Fig. 35).

*c) Profundidad media (160-240m).* En el mapa se pueden observar tres áreas de distribución bien definidas (Fig. 35), la primera al sur de la cuenca sobre depósitos de acumulación de piedemonte (< 6°) con cauces procedentes de las partes altas de las laderas de las montañas sedimentarias, la segunda es en el contacto de una zona de rampa volcánica (6-15°), reconocida como toba y una pequeña área de acumulación (< 6°) que corresponde a lahares en la parte media de la subcuenca, y

la tercera sobre una rampa volcánica (6-15°) de andesitas en el sector medio alto de la subcuenca. Por las características litológicas se puede inferir que esa es la razón por la que se ve limitada la profundidad de disección en estas áreas.

*d) Profundidad media-alta (240-320m).* Posee dos sectores al interior de la subcuenca el primero en la zona marginal a las montañas sedimentarias (15 a 35°) y las rampas volcánicas (6 a 15°) sobre depósitos de acumulación, y el segundo en la parte alta de la subcuenca en la intersección de las laderas de edificios volcánicos (15 y 35°) con dacitas-andesitas y las rampas volcánicas (6 a 15°) de andesitas (Fig. 35); coincidiendo en los rangos de pendiente en ambos sectores y con propiedades litológicas que pueden limitar la disección fluvial por lo que la edad e intemperismo de los depósitos explica la socavación en estas regiones.

*e) Profundidad alta (> 320m).* Se pueden distinguir tres áreas (Fig. 35). La primera en la región de montañas sedimentarias de caliza y lutita con pendientes que pueden ser mayores a 60°, situación que favorece la disección del relieve. La siguiente se observa en las cabeceras de los barrancos sobre la rampa volcánica de andesita en inclinaciones de hasta 35°. Finalmente, la última se ubica en la región de mayor altitud de la subcuenca sobre la ladera de dacita-andesita del Pico de Orizaba 15 y 35°, sin embargo, no hay cauces definidos para esta zona.

La obtención de los mapas de altimetría, pendientes, densidad de disección y profundidad de disección sirvió de base para la regionalización de formas del relieve al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto, ya que se lograron identificar preliminarmente los contactos entre áreas de valles fluviales con piedemontes, montañas sedimentarias, rampas volcánicas y edificios volcánicos; además de inferir sitios con más propensión a eventos de remoción en masa. Estos resultados brindan una guía para la delimitación inicial de las formas del relieve en un mapa de geoformas, que junto con las propiedades geológicas pueda ser más elaborado a mayor detalle.

### 3.1.2 Geformas al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto

Con el análisis morfométrico y la revisión bibliográfica se logró la identificación de quince unidades geomorfológicas (Fig. 36):

#### Relieve volcánico

- a) Coladas de lava (Años 1545, 1566 y 1613).
- b) Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.).
- c) Laderas cubiertas por flujo piroclástico (8200 años A.P.).
- d) Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.).
- e) Colada de lava (16,500 años A.P.).
- f) Rampa piroclástica (16,500 años A.P.).
- g) Relicto de colapso (290-210 Ka).
- h) Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka).
- i) Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno).

#### Relieve endógeno-modelado

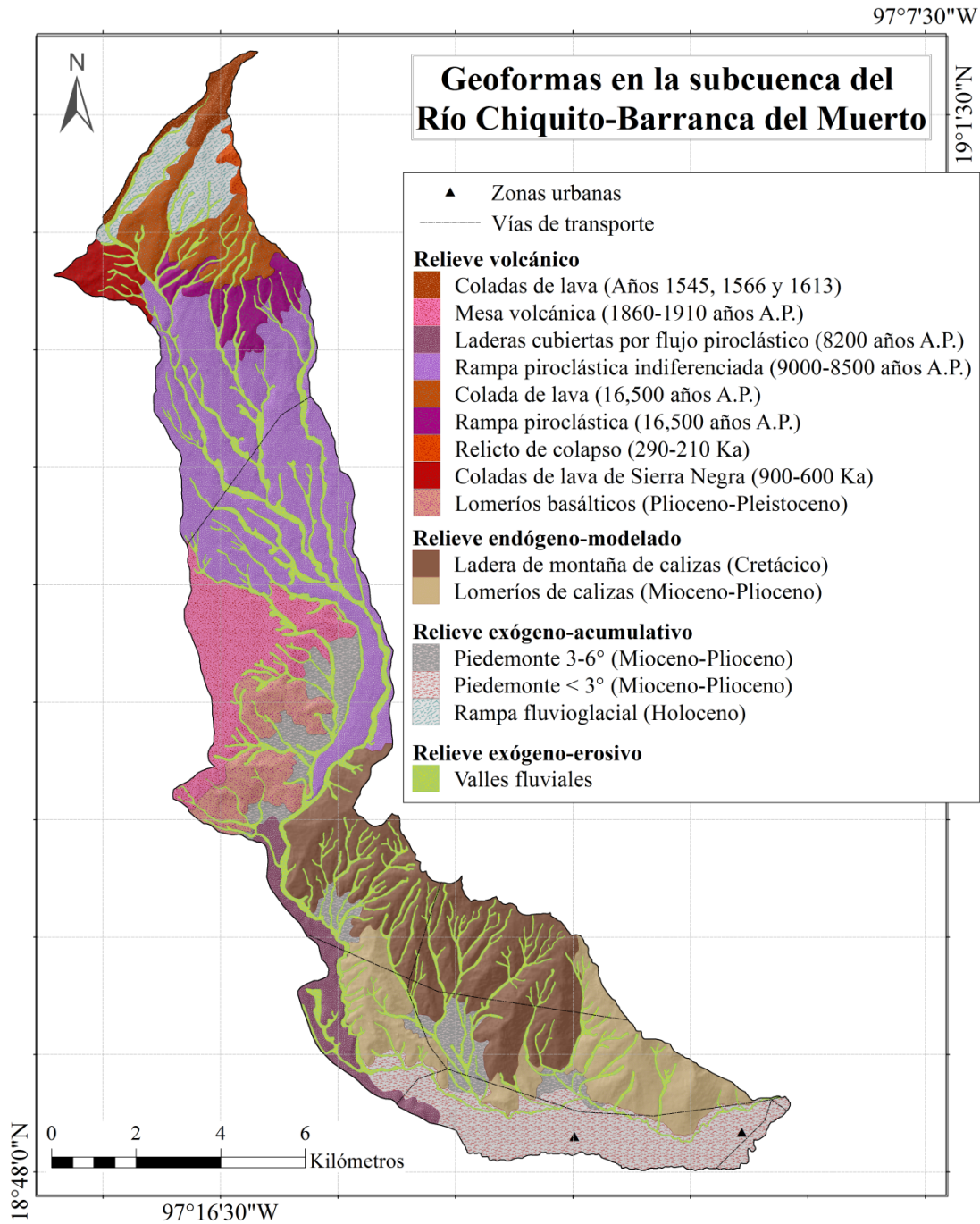
- a) Ladera de montaña de calizas (Cretácico).
- b) Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

#### Relieve de acumulación y erosión

- a) Piedemonte 3-6° (Mioceno-Plioceno).
- b) Piedemonte < 3° (Mioceno-Plioceno).
- c) Rampa fluvioglacial (Holoceno).

#### Relieve exógeno-erosivo

- a) Valles fluviales.



**Figura 36.** Mapa de geoformas de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

***i) Relieve volcánico.***

Se trata de un relieve que conjunta geoformas relacionadas principalmente a la actividad volcánica del Pico de Orizaba durante el Terciario en sus tres etapas fases eruptivas (ver subcapítulo 2.1). Las evidencias de erosión que predominan son ocasionadas por las actividades asociadas al cambio de

uso de suelo, principalmente en zonas destinadas a la agricultura donde se observa la formación de grietas, cárcavas y el desencadenamiento de procesos de remoción en masa. Este relieve se distribuye prácticamente en toda la subcuenca desde los 1600 a los 5675 m s. n. m. en nueve estructuras: Relicto de colapso (290-210 Ka), Coladas de lava (Años 1545, 1566 y 1613), Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka), Colada de lava (16,500 años A.P.), Rampa piroclástica (16,500 años A.P.), Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.), Laderas cubiertas por flujo piroclástico (8200 años A.P.), Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.) y Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). A continuación se describen a detalle:

**a) *Coladas de lava (Años 1545, 1566 y 1613).***

Es una geoforma conformada por diversos flujos de lava que cubren antiguos depósitos, cuyo origen se asocia al final del periodo efusivo del actual Pico de Orizaba. Consta de tres estructuras que corresponden a coladas de lavas históricas que ocurrieron los años 1545, 1566 y 1613 durante el episodio eruptivo Excola, un episodio que comenzó con una erupción dacítica pliniana hace 700 años aproximadamente, consta de siete erupciones entre los años 1537-1687 y fue nombrado así por Höskuldsson y Robin, 1993. El flujo de lava de 1545 es el segundo del episodio eruptivo Excola, se ubica al suroeste del cráter y es visible entre los 4040 y los 4500 m s. n. m. En tanto que el flujo de 1566 fue el tercero del periodo Excola y es producto de actividad explosiva en el centro del cráter, se localiza entre los 4500 y 4920 m s. n. m. cubriendo parte del flujo de lava de 1545. Finalmente, el flujo de 1613, presenta una mayor extensión entre 4460 y 5600 y cubre parcialmente a los flujos de 1545 y 1566 (Carrasco-Núñez et al., 1993; Macías, 2005). Esta geoforma se localiza al extremo noroeste de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto, cubre 1.53 km<sup>2</sup> y las pendientes van de 9 a 65°. El uso de suelo que se le da es solo de belleza escénica y actividades recreativas de montañismo (Fig. 37b).

**b) *Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.).***

Es una estructura ubicada al sur del actual Pico de Orizaba en la localidad de Texmalaquilla, en términos generales está constituida por una secuencia peleana de flujos piroclásticos con bloques y cenizas datado entre hace 1860 y 1910 años que fue nombrada Ignimbrita Texmalaquilla, en ella se observa un flujo de escoria y cenizas cubierto por un flujo de bloques de andesita-dacita y cenizas (Höskuldsson y Robin, 1993). Se encuentra entre los 2580 y 3000 m s. n. m., ocupa 8.1 km<sup>2</sup> con pendientes menores a los 5° en prácticamente toda su área. El uso de suelo que se le da es principalmente agrícola (Fig. 37h).



**c) Laderas cubiertas por flujo piroclástico (8200 años A.P.).**

Se trata de una geoforma que se correlaciona con la secuencia eruptiva Loma Grande ocurrida hace 8,200 años A.P. (Robin y Cantagrel, 1982). Su formación es a partir de la remoción de materiales que fueron depositados en las regiones más altas de la subcuenca y que se conforman por bloques y cenizas. Su distribución se observa desde los 1550 a los 2180 m s. n. m. ocupando un área de 3.99 km<sup>2</sup>, con pendientes de 2 a 48°. El uso de suelo que se le da es de agricultura y asentamientos urbanos (Fig. 37e).

**d) Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.).**

Es una unidad originada por la actividad eruptiva ocurrida durante las diferentes fases de formación del Pico de Orizaba, su fracción más superficial se puede asociar con los eventos explosivos que originaron la ignimbrita Citlaltépetl hace 9000-8500 años A.P. (Carrasco-Núñez y Rose, 1995), la cual depositó flujos piroclásticos y de lava andesítica de hasta 30 km del cráter dirigidos en todos los flancos del Volcán. La composición de la ignimbrita Citlaltépetl muestra dos miembros separados por un depósito de caída, el inferior formado por flujos de escoria y pómez con un lahar intercalado, mientras que el miembro superior es una capa de escorias y pómez (Höskuldsson y Robin 1993; Rossotti, 2005;). Se ubica entre los 2400 y los 3820 m s. n. m., con pendientes de 1 a 42° y una superficie de 25.82 km<sup>2</sup>. Posee suelos fértiles al estar derivados de productos volcánicos, situación que ha favorecido el establecimiento de grandes extensiones agrícolas, las cuales dominan el uso de suelo en la zona (Fig. 37g).

**e) Colada de lava (16,500 años A.P.).**

Es un relieve que se formó hace 16,500 años A.P. durante la segunda etapa de formación del Pico de Orizaba asociada al paleovolcán Espolón de Oro, tiene un espesor de 150 a 200 m y está conformado por andesita porfídica masiva, dacita microporfídica y brechas intercaladas, actualmente lo cubren depósitos de caída y paleosuelos (Macías, 2005; Höskuldsson, 1992). Se ubica entre los 3460 y los 4080 m s. n. m. al sur del cráter del actual Pico de Orizaba con una superficie de 4.68 km<sup>2</sup>, presenta pendientes de 5 a 55° y un uso de suelo de belleza escénica y actividades recreativas de montañismo (Fig. 37d).

**f) Rampa piroclástica (16,500 años A.P.).**

Es una geoforma conformada por andesitas que se formaron hace 16,500 años A.P. durante la primera fase de formación del Pico de Orizaba y su constitución está dada por andesitas basálticas con olivino. Consta de tres unidades, la unidad basal tiene un espesor de 3-4 m y muestra andesita basáltica con olivino; en tanto que la unidad central presenta una composición de bloques, lava

andesítica y brechas que responde a una secuencia de 80 m de espesor parcialmente cubierta por lahares y tefra, mientras que la unidad superior es un fracturado flujo de lava andesítica; en conjunto se les nombra Andesita y Dacita Alpinahua y presentan una superficie erosiva similar a las de los hummocks originados por avalanchas (Höskuldsson, 1992; Rossotti, 2005). Está situada al norte de la subcuenca entre los 3480 y los 4080 m s. n. m., cuenta con 3.28 km<sup>2</sup>, pendientes de 4 a 50° y uso de suelo de belleza escénica y actividades recreativas de montañismo (Fig. 37f).

**g) Relicto de colapso (290-210 Ka).**

Es una estructura de andesita altamente erosionada, fracturada e intemperizada producto del colapso del paleovolcán Torrecillas hace 290-210 Ka (Rossotti, 2005). Sus depósitos fueron nombrados Andesita Torrecillas y responden a una secuencia de diferentes productos volcánicos, el primero son brechas alteradas con espesores de 3 a 5 m, bloques angulares mayores a los 1.5 m y pequeñas rocas de andesita; el segundo pertenece a depósitos estratificados de caída de 20 cm de espesor, en ellos se observa una matriz arenosa con fragmentos de andesitas, dacitas, pómez y escoria; y el último depósito corresponde a andesitas porfídicas presentes en la formación del paleovolcán Torrecillas (Robin y Cantagrel, 1982; Höskuldsson, 1992; Carrasco-Núñez y Gómez Tuena, 1997). Se encuentra al noreste de la subcuenca en un rango altitudinal de 4260 a 4740 m s. n. m., posee pendientes de 3 a 70° en una extensión de 0.38 km<sup>2</sup>. Su uso de suelo se restringe a belleza escénica y actividades recreativas de montañismo (Fig. 37a).

**h) Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka).**

Es un relieve formado antes del paleovolcán Torrecillas y está constituido por flujos de lava andesita basáltica y andesíticas emitidas por el Volcán Sierra Negra hace 900-600 Ka (Höskuldsson y Robin, 1993; Carrasco-Núñez y Gómez Tuena, 1997). Se localiza al noroeste de la subcuenca entre las cotas de 3720 a 4540 m. s. n. m., con una orientación sureste y pendientes de 3 a 65°, abarca una fracción de 1.77 km<sup>2</sup> y tiene un uso de suelo de belleza escénica y actividades recreativas de montañismo, también alberga al Telescopio Milimétrico Alfonso Serrano a cargo del Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica y de la Universidad de Massachusetts (Fig. 37c).

**i) Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno).**

Esta unidad coincide con el depósito geológico *TplQptB* (descrito en el apartado 2.1.2 Geología), el cual data de finales del Plioceno y principios del Pleistoceno. Son dos estructuras que se localizan en la porción media de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca de Muerto con un área de 2.83 km<sup>2</sup>, en un rango de 2280 a 2800 m s. n. m. y con pendientes de 5 a 70°. A pesar de tener pendientes

altas en algunas áreas el uso de suelo es agrícola, no obstante también cuenta con áreas de reforestación (Fig. 37i).

**ii) Relieve endógeno-modelado.**

Es un relieve que rompe con el paisaje típico de una zona volcánica, las formas redondeadas de sus cumbres y las pendientes tan abruptas evidencian su origen marino-sedimentario. La erosión que se presenta es por un lado debida a la naturaleza de los materiales y por el otro ocasionada por prácticas antrópicas como son la agricultura y el establecimiento de carreteras, las evidencias de erosión más comunes son las caídas de bloques y desprendimientos de laderas. En la subcuenca se observan en el sector sureste entre los 1300 a los 2680 m s. n. m. y cuentan con la estructura de ladera de montaña de roca caliza y la de lomeríos de roca caliza, descritas a continuación:

**a) Ladera de montaña de roca caliza (Cretácico).**

Esta forma del relieve es una alternancia de calizas y lutitas que se formaron a partir de depósitos calcáreos arrecifales y subarrecifales que datan del Cretácico Superior (SGM, 2000). Se localiza al sureste de la subcuenca entre 1400 y 2680 m s. n. m., se extiende en 19.5 km<sup>2</sup> y posee pendientes de 3 a 72°. No obstante, las pendientes abruptas desde hace varios años se han tratado de dar un uso de suelo agrícola sobre todo en las cimas, sin embargo, la baja fertilidad del suelo contribuye a su abandono; debido a esto se hacen continuas reforestaciones que posteriormente servirán para el aprovechamiento maderero (Fig. 37j).

**b) Lomeríos de roca caliza (Mioceno-Plioceno).**

Son las estructuras con la edad geológica más antigua al provenir del Cretácico Inferior, se constituyen por rocas calizas de origen arrecifal y subarrecifal con reemplazamiento de dolomita (SGM, 2000). Son cuatro regiones que se ubican en el sector sureste de la subcuenca entre 1300 y 1900 m s. n. m., juntas abarcan 11.18 km<sup>2</sup> y presentan pendientes de 6 a 55°. El uso de suelo es para tala y agricultura a pesar de las pendientes abruptas y baja fertilidad del suelo (Fig. 37k).

**iii) Relieve exógeno-acumulativo.**

Este relieve agrupa geoformas relacionadas con una dinámica del paisaje más reciente, por ejemplo, la acumulación de materiales volcánicos y sedimentarios en áreas de poca pendiente, y la erosión que se genera en los procesos de formación y derretimiento de hielo en zonas glaciales del Pico de Orizaba. Son unidades con una amplia distribución por toda la subcuenca, dos estructuras

relacionadas a la acumulación como son piedemonte (6-3°) y piedemonte (< 3°); y a procesos erosivos-acumulativos tal como rampa fluvioglacial.

**a) Piedemonte 3-6° (Mioceno-Plioceno).**

Es una geoforma formada a partir de la remoción de depósitos presentes en las regiones más altas de la subcuenca, al ser un material retrabajado resulta complicado establecer una secuencia de eventos, no obstante, su distribución se delimita por los cambios suaves en la pendiente asociados a la cercanía con zonas de ladera donde incrementa drásticamente pendiente. Esta unidad se puede observar en siete regiones con diferentes altitudes (1400- 1440 m s.n. m., 1500-1740 m s.n. m., 1860-2040 m s.n. m., 2260-2340 m s.n. m., 2460-2580 m s.n. m. y 2480-2620 m s.n. m.) y juntas poseen una superficie de 3.86 km<sup>2</sup>. No tiene un uso definido, no obstante, en las pendientes suavizadas se han establecido campos agrícolas y comunidades urbanas (Fig. 37l).

**b) Piedemonte < 3° (Mioceno-Plioceno).**

Esta unidad se forma a partir del aporte de material volcánico y sedimentario proveniente de las partes más altas de la subcuenca y de las montañas sedimentarias. Tiene un área de 10.07 km<sup>2</sup> y en ella llegan usualmente las fracciones más fina de los flujos de escombros, lo que deriva en pendientes casi nulas (<1°) que resultan atractivas para el establecimiento de áreas urbanas, razón por la cual las poblaciones de Ciudad Mendoza, Nogales y Orizaba se han ganado terreno en los últimos años (Fig. 37m).

**c) Rampa fluvioglacial (Holoceno).**

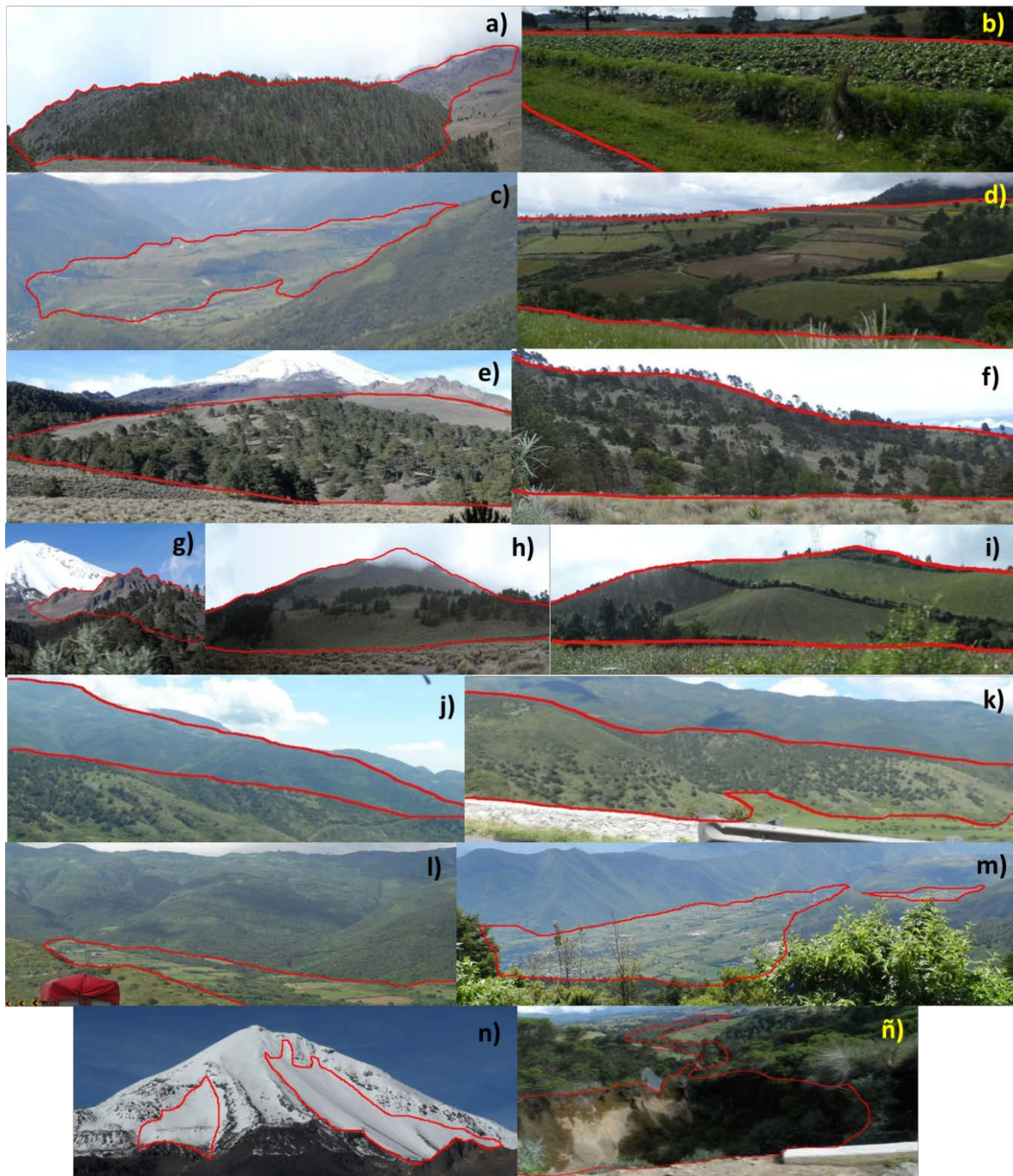
Se trata de una geoforma que se establece sobre las laderas sur del actual Volcán Pico de Orizaba, el modelado de esta unidad se asocia a la dinámica glacial que ocurre en la cumbre del Volcán; por lo que la intensidad erosiva ocurrirá cuando existan las condiciones meteorológicas (alta humedad y bajas temperaturas) que permitan la formación de nieve que alimenta los glaciales y las que favorezcan su derretimiento (lluvias y aumento de la temperatura). La erosión que se puede presentar es la formación de morrenas y el arrastre de materiales producto de deshielo. Esta estructura abarca 3.57 km<sup>2</sup> en un rango altitudinal de 3980 a 5675 m s. n. m., con pendientes de 11 a 40° y uso de suelo de belleza escénica y actividades recreativas de montañismo (Fig. 37n).

**iv) Relieve exógeno-acumulativo.**

Este relieve agrupa una geoforma relacionada con las escorrentías que fluyen por los cauces principalmente en la temporada de lluvias y por ende asociadas a la formación de procesos de remoción en masa y con una amplia distribución por toda la subcuenca.

**a) Valles fluviales.**

Es una unidad que se distribuye en toda la subcuenca y se caracterizan por tener corrientes estacionales. El tipo de drenaje generalmente es dendrítico con cauces que van de 35 a 120 m de ancho, pendientes de 30 a 70° y una superficie de 14.78 km<sup>2</sup>. Si bien es una geoforma en la que se espera ocurran procesos erosivos, los efectos de dicha erosión actúan de manera diferencial a lo largo de la subcuenca, ya que en regiones altas de la subcuenca se observa la formación de cárcavas y acrecentamiento de sus cabeceras, la cual puede ser atribuida a la baja estabilidad de los materiales y a la construcción de terracerías. En las zonas medias los valles fluviales son el único sitio donde se observa vegetación natural, no obstante también tienen mayor incidencia los procesos de remoción en masa desencadenados por la formación de grietas y cárcavas, derivados de la erosión ocasionada por la presencia de campos agrícolas que se extienden hasta áreas marginales a los barrancos. En la parte baja de la barranca los procesos erosivos se atribuyen más a la naturaleza de los materiales sedimentarios, pero también han influido actividades de agricultura, tala y construcción de caminos (Fig. 37ñ).



**Figura 37.** Geoformas de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto. a) Coladas de lava (Años 1545, 1566 y 1613). b) Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). c) Laderas cubiertas por flujo piroclástico (8200 años A.P.). d) Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). e) Colada de lava (16,500 años A.P.). f) Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). g) Relicto de colapso (290-210 Ka). h) Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). i) Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). j) Ladera de montaña de calizas (Cretácico). k) Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno). l) Piedemonte 3-6° (Mioceno-Plioceno). m) Piedemonte < 3° (Mioceno-Plioceno). n) Rampa fluvio-glacial (Holoceno) y ñ) Valles fluviales.

En resumen, al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto existen geoformas provenientes de eventos volcánicos y sedimentarios, situación que incide en la presencia de procesos de inestabilidad de ladera; tal como lo reporta Legorreta et al. (2014) quien cuantificó 442 procesos gravitacionales al interior de la subcuenca, de los cuales dos tercios se encuentran en depósitos volcánicos y el resto se localiza en depósitos sedimentarios erosionados. Al asociar las geoformas aquí presentadas con los resultados de Legorreta et al., 2014, se observa que en las geoformas cuya composición es principalmente andesítica correspondientes a relicto de colapso (290-210 Ka), laderas de lava (1545, 1566 y 1603), coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka) y colada de lava (16,500 años A.P.) son frecuentes los desprendimientos de rocas; en tanto que las geoformas que poseen depósitos de caída de ceniza y flujos piroclásticos como son la rampa piroclástica (16,500 años A.P.), rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.), mesa volcánica (1860-1910 años A.P.) y lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno) se presentan desprendimientos de rocas y eventos superficiales (flujos de escombros) pero son más comunes los deslizamientos de asentamiento profundo; finalmente, las unidades de ladera de montaña de roca caliza y lomeríos de roca caliza los flujos de lodo y los flujos de escombros se observan en sus depósitos sedimentarios más intemperizados.

### **3.2 Variables cartográficas de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto**

El modelo teórico (Fig. 33) propuesto en este trabajo nos permitió razonar cuáles son los usos de suelo actuales y cuáles son las variables que se asocian a procesos de inestabilidad de ladera para ubicar las áreas con inestabilidad de laderas por cambio de uso de suelo. A continuación, se muestran los resultados de dichas variables.

#### **a) Cambio de cobertura vegetal (2003 y 2012)**

El resultado de la clasificación supervisada arrojó dos mapas de uso de suelo para 2003 y 2012 (Fig. 38); mismos que coadyuvaron al análisis individual de la distribución del uso de suelo al interior de la zona de estudio. A continuación, se muestran las características de cada una de las cubiertas que integran la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto:

**1. Nieve y hielo:** Esta cubierta se distribuye exclusivamente en las cimas de los edificios volcánicos Pico de Orizaba y Sierra Negra, en ocasiones llega a descender a los 4000 m. s. n. m. pero su distribución se mantiene constante en el rango de los 4500 a los 5636 m. s. n. m. Es una cubierta que visualmente muestra coloraciones de blanco a cian en la imagen de satélite con combinación verde-rojo-infrarrojo cercano (Fig. 38.1b); espectralmente posee los niveles digitales

máximos para el rango del rojo (245-255) e infrarrojo cercano (165-255), lo cual puede observarse en su grafico de dispersión (Fig. 38.1d). El uso de suelo que se le da es el de belleza escénica y actividades recreativas de montañismo (Fig. 38.1a).

**2. Suelo sin vegetación aparente:** Es una cubierta que se distribuye en toda la subcuenca, pero se encuentra mejor representada en las laderas de los edificios volcánicos Pico de Orizaba y Sierra Negra entre los 4000 y 5200 m. s. n. m. Adquiere coloraciones cian en la imagen de satélite con combinación verde-rojo-infrarrojo cercano, (Fig. 38.2b); espectralmente los niveles digitales para el rango del rojo (110-195) e infrarrojo cercano (100-170) muestran valores de medios a altos de acuerdo a su grafico de dispersión (Fig. 38.2d). En las zonas de mayor altitud el uso de suelo que se le da es el de belleza escénica y actividades recreativas de montañismo, y en el resto de la subcuenca destacan campos de cultivo en reposo, terracerías y minas a cielo abierto (Fig. 38.2a).

**3. Pastizal de alta montaña:** La distribución de esta cubierta se da en las regiones altas de la subcuenca, específicamente en la base de los conos volcánicos Pico de Orizaba y Sierra Negra entre los 3700 y 4200 m. s. n. m., las especies herbáceas que se observan son: *Calamagrostis eriantha*, *Calamagrostis orizabae*, *Calamagrostis tolucensis*, *Cirsium nivale*, *Eryngium monocephallum*, *Festuca tolucensis*, *Festuca livida*, *Hieracium comatum*, *Loeselia sp.* y *Stipa editorum*. Las coloraciones en la imagen de satélite con combinación verde-rojo-infrarrojo cercano son de rosas a rojos pálidos (Fig. 38.3b); los valores de niveles digitales para el rango del rojo (115-140, 155-170) e infrarrojo cercano (90-120, 135-145) se dividen en medio y medio-alto del grafico de dispersión (Fig. 38.3d). El principal uso de suelo que se le da es el de belleza escénica y actividades recreativas de montañismo, no obstante, en las regiones bajas se han instalado algunos campos de cultivo cercanos a la terracería (Fig. 38.3a).

**4. Bosque de coníferas:** Esta cubierta coincide con la distribución de la cubierta de pastizales, se encuentra en la base de los conos volcánicos Pico de Orizaba y Sierra Negra entre los 3900 y 4200 m. s. n. m. Las especies arbóreas que destacan son *Abies religiosa*, *Abies hickelii*, *Pinus ayacahuíte*, *Pinus hartwegii* y *Pinus pseudostrabus*. Se observa con tonos rojos oscuros en la combinación verde-rojo-infrarrojo cercano (Fig. 38.4b); los niveles digitales en el rango del rojo (55-90) e infrarrojo cercano (55-85) se localizan en la región baja del grafico de dispersión (Fig. 38.4d). El principal uso de suelo que se le da es el de belleza escénica y actividades recreativas de montañismo, sin embargo, se observa la presencia de campos de cultivo y actividades de tala forestal en las zonas cercanas a las terracerías y brechas (Fig. 38.4a).



**5. Bosque de pino-encino:** Se trata de una cubierta que se distribuye en los sectores con altitudes de 2600 a 3600 m. s. n. m. Destacan especies arbóreas como *Alnus jorullensis*, *Alnus firmifolia*, *Arbutus xalapensis*, *Buddleia* sp., *Pinus leiophylla*, *Pinus patula*, *Quercus oleoides*, *Quercus glabrescens* y *Quercus laurina*. En la imagen de satélite con combinación verde-rojo-infrarrojo cercano se visualiza con tonos rojos medios a rojos oscuros (Fig. 38.5b); los valores para el rango del rojo (43-110) e infrarrojo cercano (49-95) se observan de bajos a medios de acuerdo a su gráfico de dispersión (Fig. 38.5d). Son zonas con uso de suelo que va desde belleza escénica y actividades recreativas de montañismo hasta tala ilegal, su distribución se restringe a los barrancos presentando un continuo disturbio en las zonas contiguas a los campos agrícolas (Fig. 38.5a).

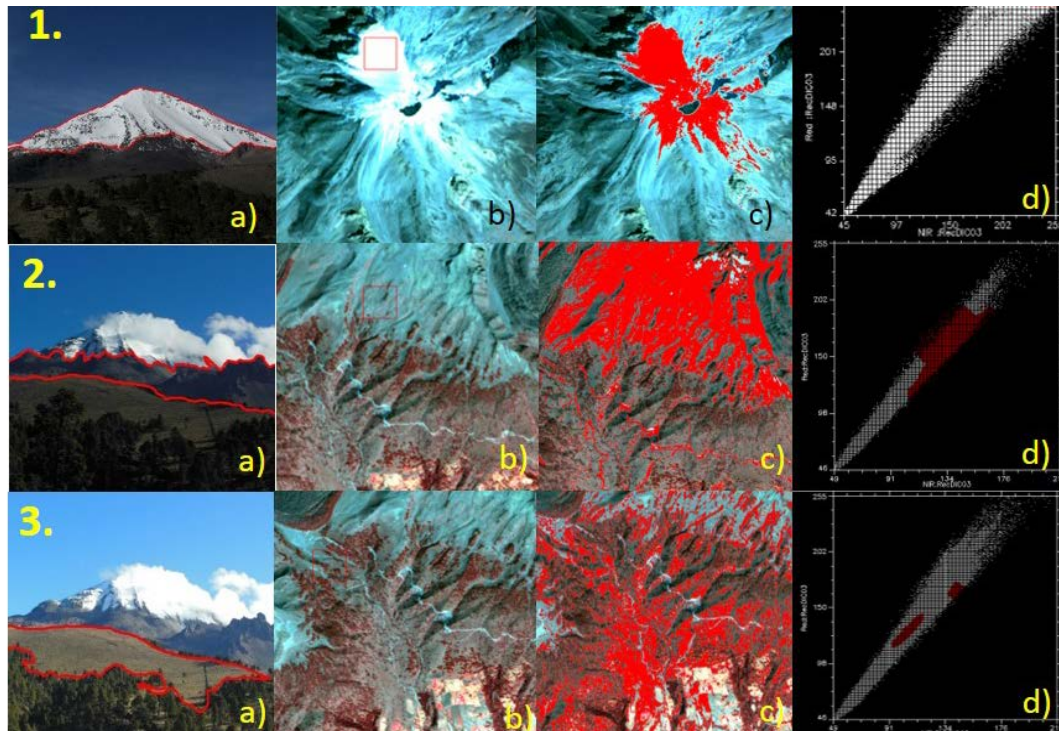
**6. Bosque de latifoliadas:** Es una cubierta con distribución en altitudes de 1500 a 2700 m. s. n. m. Las especies arbóreas que se presentan son: *Alnus jorullensis*, *Alnus firmifolia*, *Arbutus xalapensis*, *Buddleia* sp., *Cedrela* sp., *Juniperus deppeana*, *Pinus leiophylla*, *Pinus patula*, *Prunus serotina*, *Quercus candicans*, *Quercus castanea* y *Quercus peduncularis*. En la combinación verde-rojo-infrarrojo cercano de la imagen de satélite se visualiza con tonos rojos intensos (Fig. 38.6b); los valores para el rango del rojo (47-88) e infrarrojo cercano (47-97) se muestran bajos a medios en el gráfico de dispersión (Fig. 38.6d). En su mayoría son áreas modificadas en su vegetación natural, ya que se les ha dado un uso de suelo de reforestación desde hace más de 30 años, además, la extracción ilegal de madera es común y las actividades agrícolas han ido en aumento a pesar de tener suelos compactos (Fig. 38.6a).

**7. Matorral inerme:** Esta cubierta se distribuye desde los 1300 a 4200 m s. n. m., principalmente se expresa en campos agrícolas abandonados o con alta pedregosidad; también se le observa en áreas circundantes a vegetación natural, campos de cultivo, caminos y áreas urbanas. Las especies arbustivas que la representan son: *Acacia farnesiana*, *Baccharis conferta*, *Baccharis salicifolia*, *Fuchsia fulgens*, *Montanoa tomentosa*, *Roldana lobata*, *Rubus trilobus* y *Senecio salignus*. En la imagen de satélite con combinación verde-rojo-infrarrojo cercano se visualiza con tonos rosas pálidos a cafés (Fig. 38.7b); en el gráfico de dispersión (Fig. 38.7d) se muestran valores medios para el rango del rojo (97-162) e infrarrojo cercano (91-123). Son zonas cuyo uso de suelo principal es el de pastoreo, también sirven como indicadoras de disturbio en áreas de vegetación natural (Fig. 38.7a).

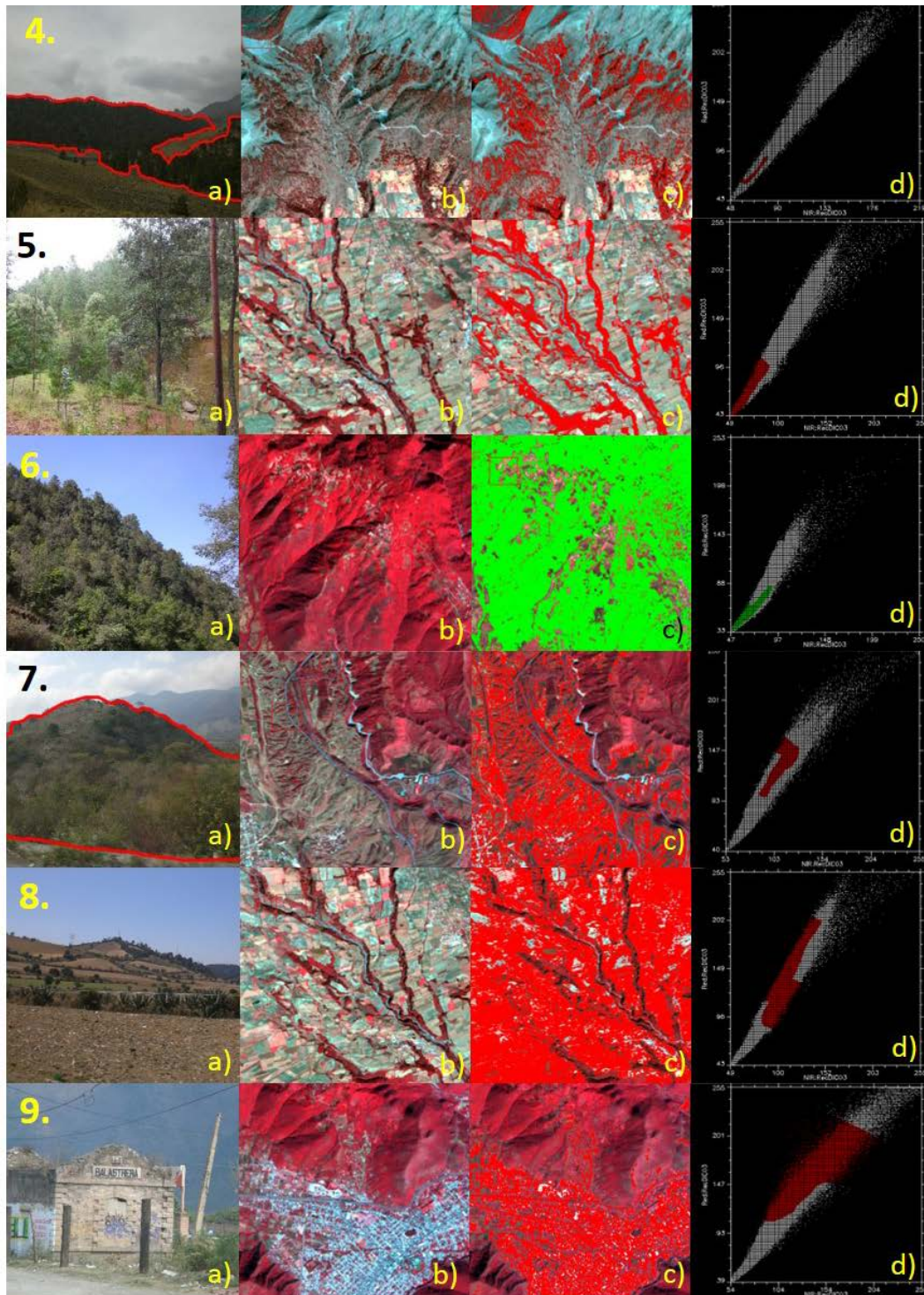
**8. Agricultura:** Es una cubierta con distribución extendida desde los 1300 hasta 3700 m. s. n. m. Los cultivos que se observan son: aguacate, alfalfa, avena forrajera, brócoli, calabaza, caña,

cebada, chícharo, chile, col, espinacas, frijol, habas, limón, maíz, papa, plátano, tomate rojo, tomate verde y zanahoria. Las coloraciones en la imagen de satélite con combinación verde-rojo-infrarrojo cercano (Fig. 38.8b), son diversas dependiendo del tipo de cultivo (escala de tonos rojos), la etapa en su ciclo de vida (rojos a rosa pálido) o si el terreno de cultivo está descansando (escala de tonos cian); de igual forma los valores de niveles digitales son amplios, pero se conservan en términos bajos a altos para el rojo (85-210) y bajos a medios para el infrarrojo cercano (85-140) en el gráfico de dispersión (Fig. 38.8d). El uso de suelo que se da es agricultura de temporal, el cual ha contribuido a la pérdida de la vegetación natural incluso en las zonas del Parque Nacional Pico de Orizaba (Fig. 38.8a).

**9. Asentamientos humanos:** En esta cubierta se presenta desde los 1300 a los 5636 m s. n. m., incluye ciudades, comunidades, casas aisladas construidas con concreto, autopistas y carreteras. La combinación verde-rojo-infrarrojo cercano de la imagen de satélite muestra una escala de tonos cian (Fig. 38.9b); presenta valores medios a altos tanto para el rango del rojo (100-220) como del infrarrojo cercano (80-215) de acuerdo a su gráfico de dispersión (Fig. 38.9d). Son zonas con uso de suelo referido para vivienda, industria, educación y comunicación principalmente (Fig. 38.9a)

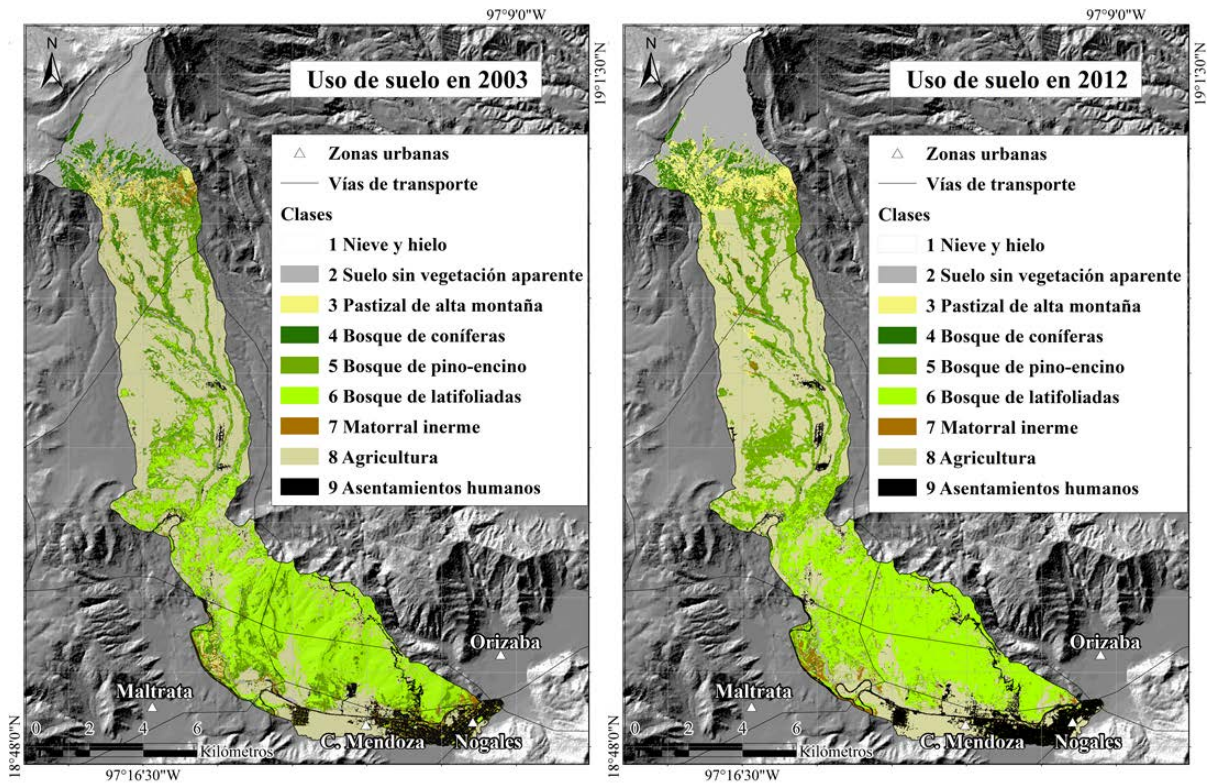


**Figura 38.** Cubiertas en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto. a) Cubierta en fotografía digital. b) Selección de clase en imagen de satélite (SPOT). c) Región de interés en imagen de satélite (SPOT). d) Región de interés en gráfico de dispersión rojo vs infrarrojo cercano.



**Figura 38 (Continuación).** Cubiertas en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto. a) Cubierta en fotografía digital. b) Selección de clase en imagen de satélite (SPOT). c) Región de interés en imagen de satélite (SPOT). d) Región de interés en grafico de dispersión rojo vs infrarrojo cercano.

Las cubiertas al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto en términos de tipos de vegetación, tienen una distribución que sigue un gradiente altimétrico respecto al nivel del mar. En otras palabras, se observa que en zonas de mayor altitud la vegetación corresponde a climas de menor temperatura, y la vegetación se transforma a una de clima tropical conforme disminuye la altura. No obstante, hay una clara intervención en la vegetación de la subcuenca, misma que ha mermado la composición y desarrollo de la vegetación natural, condicionando su distribución con actividades agrícolas, pecuarias y urbanas (Fig. 39).



**Figura 39.** Distribución del uso de suelo en 2003 y 2012 para la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

La validez de los mapas obtenida por una matriz de error, muestra que para el uso de suelo del año 2003 se presentó una validez del 80% total, la confiabilidad del usuario es menor para las cubiertas nieve y hielo (0.60), agricultura (0.69) y pastizal de alta montaña (0.77), lo que indicó que la clasificación ubico algunos sitios de una cubiertas en otra a la que no pertenecen; por ejemplo, en la cubierta nieve y hielo se evaluaron 20 sitios de los cuales 12 corresponden a la clase nieve y hielo pero el clasificador ubico a 1 en el suelo sin vegetación aparente y a 7 en asentamientos humanos. En tanto que la confiabilidad del productor es mayor para las cubiertas de bosque de coníferas (0.96), bosque de latifoliadas (0.93), nieve y hielo (0.92), así como bosque de pino-encino (0.89), lo

que se traduce en que la mayoría de sitios de verificación fueron clasificados en sus respectivas clases; en el caso de la cubierta bosque de coníferas de 27 sitios evaluados solo 1 se ubicó en la clase bosque de pino-encino (Tabla 3).

**Tabla 26.** Matriz de error del uso de suelo en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto en 2003.

2003		Mapa de cubiertas 2003											
		NH	SSV	PAM	BC	BPE	BL	MI	A	AH	Total	Error omisión	Confiabilidad productor
Referencia	NH	12								1	13	0.08	0.92
	SSV	1	24	3							28	0.14	0.86
	PAM			20				3	4		27	0.26	0.74
	BC				26	1					27	0.04	0.96
	BPE				1	24	2				27	0.11	0.89
	BL					2	27				29	0.07	0.93
	MI			3				29	6	1	39	0.26	0.74
	A		4					4	33	3	44	0.25	0.75
	AH	7	2						5	22	36	0.39	0.61
	Total	20	30	26	27	27	29	36	48	27	270	Validez 0.80	
	Error comisión	0.40	0.20	0.23	0.04	0.11	0.07	0.19	0.31	0.19			
	Confiabilidad usuario	0.60	0.80	0.77	0.96	0.89	0.93	0.81	0.69	0.81			

**NH:** Nieve y hielo. **SSV:** Suelo sin vegetación aparente. **PAM:** Pastizal de alta montaña. **BC:** Bosque de coníferas. **BPE:** Bosque de pino-encino. **BL:** Bosque de latifoliadas. **MI:** Matorral inerme. **A:** Agricultura. **AH:** Asentamientos humanos.

En el caso del mapa de uso de suelo del año 2012 se cuantificó una validez del 78% total, la confiabilidad del usuario fue menor en las cubiertas agricultura (0.68), matorral inerme (0.70) y nieve y hielo (0.73); lo que quiere decir que de 40 sitios evaluados con cubierta de agricultura solo 27 se clasificaron dentro de la clase. La mayor confiabilidad del productor se da en las cubiertas bosque de coníferas (0.89), nieve y hielo (0.86) y bosque de pino-encino (0.84); esto indica que de 28 sitios evaluados en la cubierta bosque de coníferas 25 estuvieron bien clasificados (Tabla 27).

**Tabla 27.** Matriz de error del uso de suelo en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto en 2012.

2012		Mapa de cubiertas 2012											
		NH	SSV	PAM	BC	BPE	BL	MI	A	AH	Total	Error omisión	Confiabilidad productor
Referencia	NH	19	3								22	0.14	0.86
	SSV		24	5				2	3		34	0.29	0.71
	PAM			19				5	1		25	0.24	0.76
	BC				25	3					28	0.11	0.89
	BPE				4	26	1				31	0.16	0.84
	BL					5	23	1			29	0.21	0.79
	MI			1				26	5		32	0.19	0.81
	A		4					2	27	3	36	0.25	0.75
	AH	7							1	4	21	0.36	0.64
	Total	26	31	25	29	34	24	37	40	24	270	Validez 0.78	
	Error comisión	0.27	0.23	0.24	0.14	0.24	0.04	0.30	0.33	0.13			
	Confiabilidad usuario	0.73	0.77	0.76	0.86	0.76	0.96	0.70	0.68	0.88			

**NH:** Nieve y hielo. **SSV:** Suelo sin vegetación aparente. **PAM:** Pastizal de alta montaña. **BC:** Bosque de coníferas. **BPE:** Bosque de pino-encino. **BL:** Bosque de latifoliadas. **MI:** Matorral inerme. **A:** Agricultura. **AH:** Asentamientos humanos.

La validez de los mapas de uso de suelo al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto es cercana al 80% en los dos años de evaluación. Es necesario recordar que las imágenes con las que se realizaron las clasificaciones supervisadas, fueron obtenidas para el mes de diciembre (temporada de estiaje), por lo que las cubiertas que más conflicto presentaron fueron las de agricultura, pastizal de alta montaña, nieve y hielo y suelo sin vegetación aparente, ya que sus firmas espectrales para esa época son similares al no haber un contraste de clorofila en la vegetación que pudiera contribuir a la diferenciación de las mismas. Esta situación pudiera ser corregida al utilizar imágenes satelitales de época de lluvia o cercana a ella, donde la vegetación tuviera una mayor concentración de pigmentos clorofílicos; sin embargo, en el área de estudio la temporada de lluvias termina en octubre, por lo que se presenta una continua nubosidad en la escena que cubre la subcuenca, misma que puede observarse aun en las primeras semanas de noviembre y desaparece comenzando el periodo de secas.

- **Cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012.**

Dentro de un periodo de nueve años los cambios en las cubiertas de uso de suelo no han sido drásticos, pero sí notables. Los resultados arrojaron cifras de disminución de cubiertas que van de -1.23 a -2.64 km<sup>2</sup>, indicativas de una pérdida de área en la distribución de las cubiertas suelo sin vegetación aparente, bosque de pino-encino, matorral inerme y bosque de coníferas. Por otro lado, entre 0.11 y 1.89 km<sup>2</sup> fueron ganados por las cubiertas nieve y hielo, asentamientos humanos, bosque de pino-encino, pastizal de alta montaña y agricultura (Tabla 28).

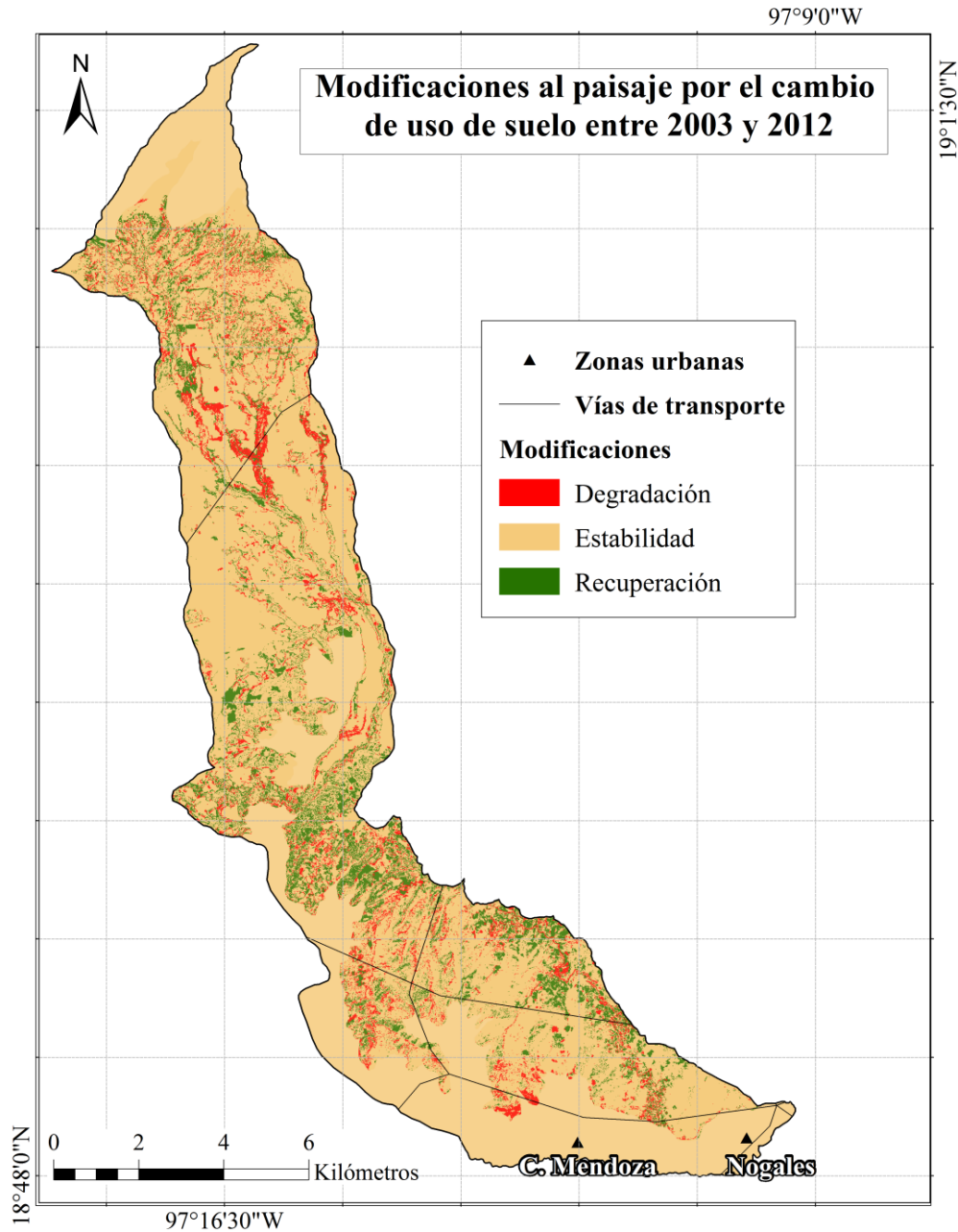
**Tabla 28.** Cambios en área de distribución de las cubiertas de uso de suelo entre 2003 y 2012.

Clases	2003 (Km <sup>2</sup> )	2012 (Km <sup>2</sup> )	Cambios 2003-2012 (Km <sup>2</sup> )
Nieve y hielo	0.06	0.17	0.11
Suelo sin vegetación aparente	10.60	9.37	-1.23
Pastizal de alta montaña	3.29	5.13	1.84
Bosque de coníferas	7.05	4.41	-2.64
Bosque de pino-encino	12.26	13.97	1.70
Bosque de latifoliadas	27.22	25.77	-1.45
Matorral inerme	3.59	2.04	-1.54
Agricultura	37.14	39.03	1.89
Asentamientos humanos	4.16	5.48	1.32

Los cambios entre cubiertas de uso de suelo reportan variaciones en las que destaca una mayor pérdida en el bosque de coníferas, ya que al distribuirse en altitudes superiores a los 3900 m s. n. m,

indica que los cambios de uso de suelo están alcanzando más zonas de resguardo del Parque Nacional Pico de Orizaba (2840-5675 m s. n. m.); lo anterior aunado al incremento de la cubierta agricultura, es indicativo de la presencia de actividades forestales y agrícolas ilícitas que derivan en la pérdida de la biodiversidad de bosques en alta montaña.

En cuanto a los resultados de las modificaciones al paisaje por el uso de suelo, se observa que de un total de 105.37 km<sup>2</sup> se han mantenido estables 80.6 km<sup>2</sup> durante nueve años, 12.97 km<sup>2</sup> se recuperaron y 11.8 km<sup>2</sup> se degradaron. El promedio de área de recuperación fue de 1.31 km<sup>2</sup> por año, destacando que los sitios con mayor recuperación se encuentran entre los 2100 y 2700 m s. n. m. En el caso de la degradación, esta presenta una distribución mayormente ligada a la de las áreas urbanas, con un promedio de 1.44 km<sup>2</sup> por año; lo que indica que existe una mayor degradación respecto a la recuperación de cubiertas (Fig. 40).



**Figura 40.** Distribución de las modificaciones al uso de suelo en 2003 y 2012.

La dinámica de degradación y recuperación de cubiertas actúa en toda la subcuenca, sin embargo, es más evidente su distribución en altitudes menores a los 4200 m s. n. m. No obstante, los cambios de temperatura y precipitación pueden influir en los procesos de degradación y recuperación de cubiertas “naturales” que se distribuyen dentro del área del Parque Nacional Pico de Orizaba; donde los efectos antrópicos no tienen inferencia con los procesos de humedad y sequía que logran una formación o derretimiento de nieve, pero si pueden afectar los ciclos de vida de la vegetación de



pastizal de alta montaña y bosque de coníferas; que pueden derivar en una mayor o menor presencia de suelo sin vegetación aparente.

Por otro lado, es evidente que alrededor de las áreas urbanas existe una mayor degradación de las cubiertas de matorral inerme y bosque de pino-encino. Lo anterior puede deberse al establecimiento de campos de cultivo, pero sobre todo por nueva infraestructura habitacional y de vías de comunicación que conlleva el crecimiento de las comunidades en altitudes menores a los 2800 m s. n. m. Respecto a la degradación en el área comprendida entre los 2800 y 4200 m s. n. m., esta se coincide con áreas que presentan tala ilegal, incendios controlados para la agricultura y expansión de espacios para la agricultura; lo que expone la presión a la que son sometidas las cubiertas bosque de coníferas y bosque de pino-encino.

En cuanto a la distribución de la recuperación esta se presenta de forma más intensa entre los 2100 y 2700 m s. n. m, de acuerdo con los datos recabados en campo estas áreas corresponden a zonas de reforestación que los comuneros han establecido con árboles principalmente de la especie *Pinus patula* proveniente de viveros propios y de programas gubernamentales, con la finalidad de frenar la deforestación y hacer uso legal de los recursos forestales. En tanto que el resto de las áreas de recuperación se atribuyen a cambios propios de los ciclos de vida dentro de los ecosistemas.

#### **b) Procesos gravitacionales (1994-2012)**

En los resultados de la delimitación de procesos gravitacionales a través de percepción remota, se obtuvieron un total 153 procesos con longitudes mayores a 10 m, 60 para 2003 y 150 para 2012; en tanto que 57 de ellos se ubicaron en ambos años. Al cuantificar el área superficial que ocupan estos procesos gravitacionales se observa que entre 2003 y 2012 se removió un área de 150,801 m<sup>2</sup> desplazando a su cubierta de vegetación o uso de suelo previo (Fig. 41).

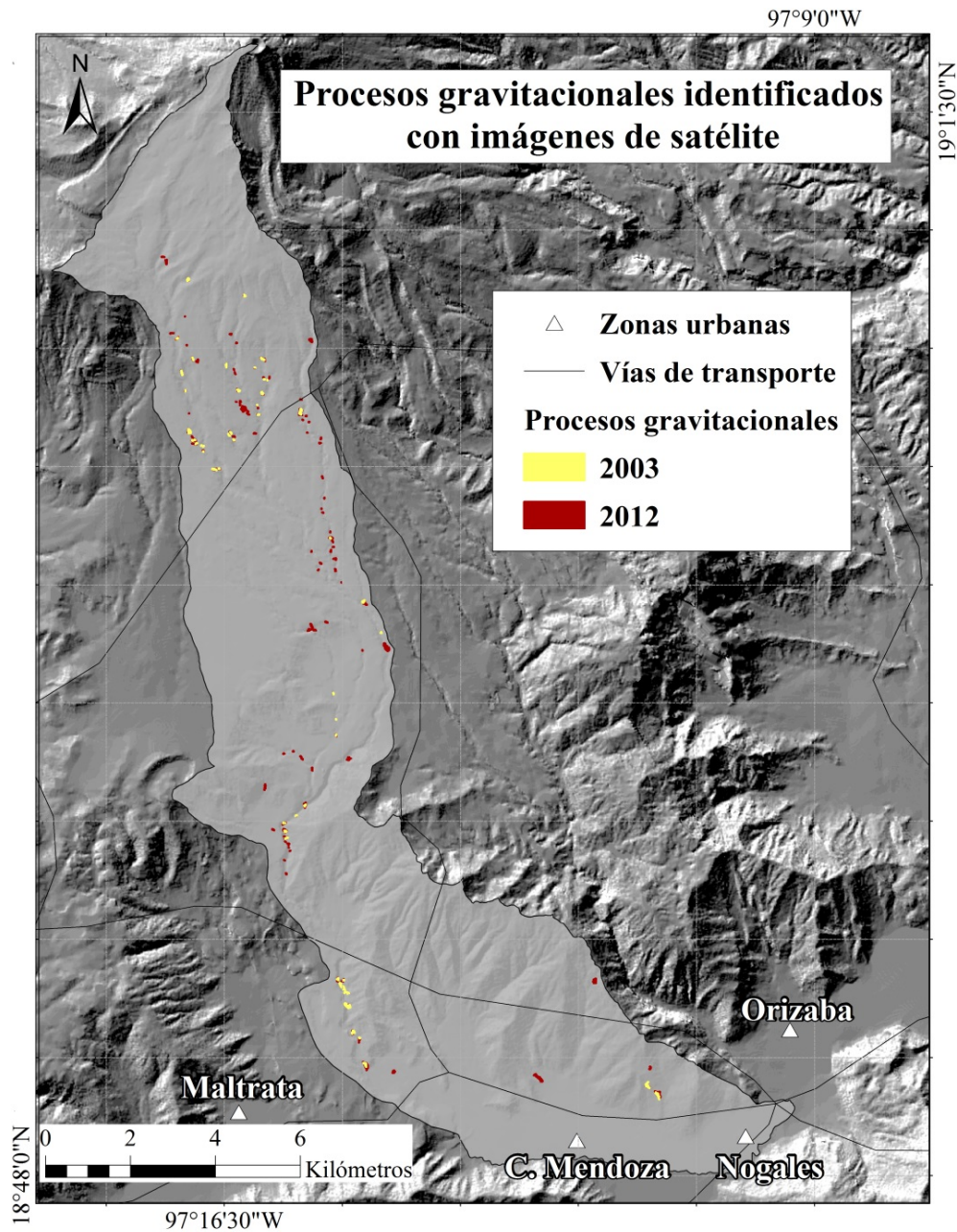


Figura 41. Procesos gravitacionales delimitados en imágenes de satélite de los años 2003 y 2012.

Si bien los bordes de los procesos gravitacionales que se ubicaron en las imágenes de ambos años no coinciden al 100%, si hay un solapamiento de al menos el 50%. Lo anterior indica que en un periodo de al menos 9 años no se lograron estabilizar o se desplazaron hacia alguno de sus laterales. Y al no encontrar evidencia de un contenido de clorofila en el NDVI que sugiera una regeneración mayor al 50% en la cubierta de vegetación, se evidencia que estos 57 procesos aún están activos.

También se pudieron identificar 93 procesos gravitacionales ocurridos en menos de 9 años y solo 3 procesos lograron estabilizarse al contar con presencia de vegetación en las áreas donde ocurrieron.

Los resultados obtenidos con percepción remota son notables en términos de la presencia y ausencia de nuevos procesos; además representan la base para ubicar los procesos más fácilmente en campo, permitiendo un diseño de muestreo más dirigido a los sitios de mayor interés de acuerdo a las necesidades del investigador.

- **Procesos gravitacionales por geoforma.**

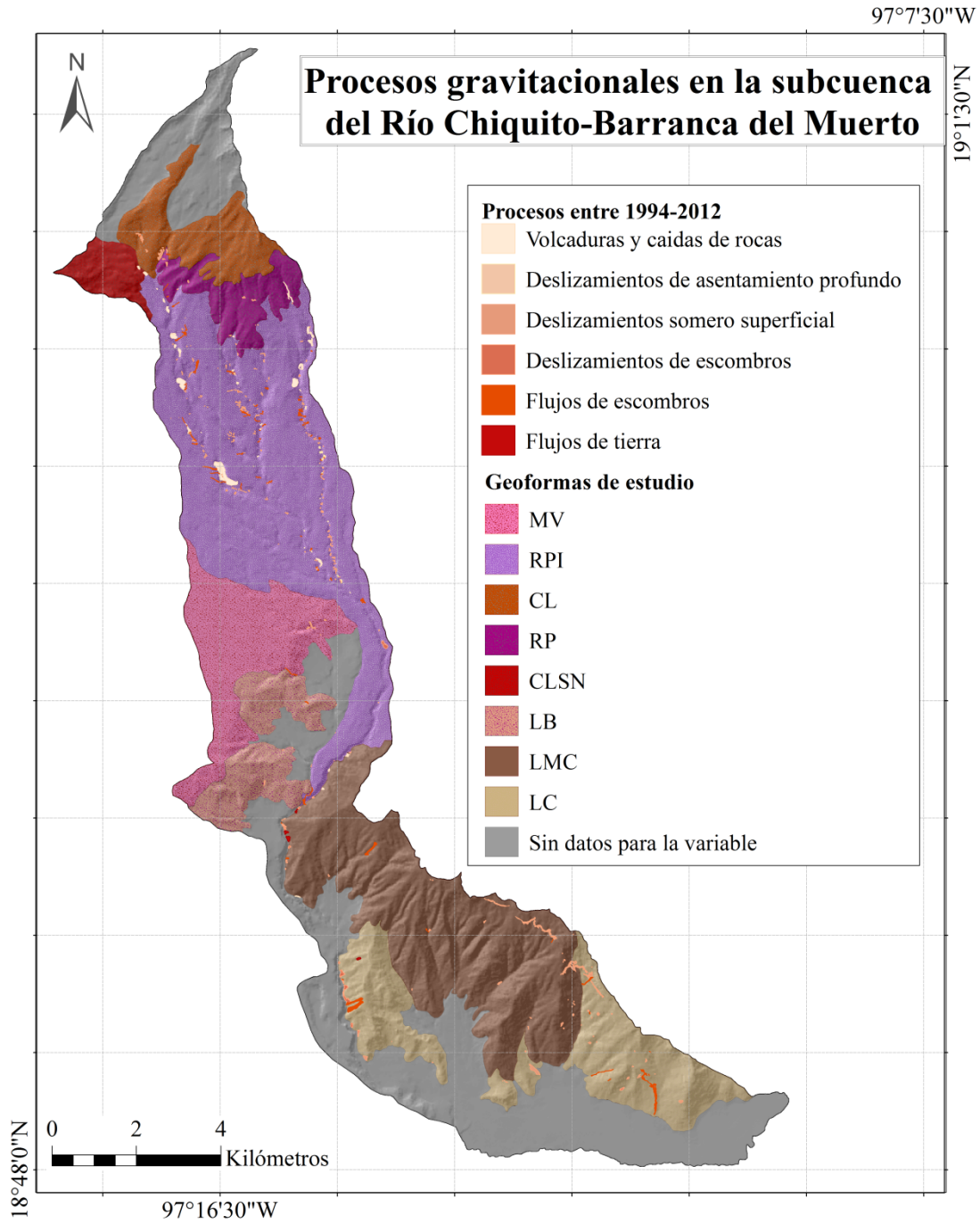
Es esta etapa se integraron 442 procesos gravitacionales mayores a 10 m ocurridos entre 1994 y 2008 (Legorreta et al., 2014) a los 153 identificados con percepción remota; coincidiendo estos últimos en un 73% con el inventario integrado. Así, se obtuvo un total de 483 procesos gravitacionales y a nivel superficial se cuantifico que el área de afectación derivada de procesos gravitacionales fue de 737,043 m<sup>2</sup>. Una de las contribuciones más importantes del inventario de Legorreta et al., 2014; fue su clasificación de procesos gravitacionales que al tener una coincidencia del 73% con el inventario con percepción remota facilito su verificación en campo y contribuyo a una tipificación más funcional de los procesos gravitacionales ocurridos en la subcuenca (Tabla 29).

**Tabla 29.** Procesos gravitacionales por geoforma.

PG (1994-2012).	Volcaduras y caída de rocas	Deslizamientos de asentamiento profundo	Deslizamientos someros superficiales	Deslizamientos de escombros	Flujos de escombros	Flujos de tierra	PG Total	Área (m <sup>2</sup> ).
<b>MV</b>			6		1		7	9,795
<b>RPI</b>	49	10	73	56	69		257	387,01
<b>CL</b>	1		8		2		11	21,538
<b>RP</b>	2		4	2	3		11	18,725
<b>CLSN</b>	2						2	3,379
<b>LB</b>			1		3		4	3,639
<b>LMC</b>	6		81	11	7	4	109	100,95
<b>LC</b>			55	11	15	1	82	192,00
<b>Total SP</b>	60	10	228	80	100	5	483	737,04
<b>Área (m<sup>2</sup>).</b>	236,780	15,878	204,672	89,847	171,80	18,07	737,04	

**PG:** Procesos gravitacionales. **MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

A partir de trabajo de campo se observó una diferenciación en la incidencia de procesos gravitacionales de acuerdo al material parental y edafológico en el que ocurrieran, elementos que comúnmente responden al tipo de geoforma en que se presenten. Siendo así, se procedió a la estratificación de los procesos gravitacionales por geoforma (Fig. 42).



**Figura 42.** Procesos gravitacionales delimitados en imágenes de satélite de los años 2003 y 2012.

Así, la suma del inventario obtenido con percepción remota y el de Legorreta et al., 2014 fue de 483 procesos gravitacionales. La geforma con más incidencia de procesos gravitacionales fue la de RPI con 257 eventos, seguida de la LMC caliza con 109 eventos y LC con 82 eventos; el resto de las geformas no presentan más de 11 eventos como máximo. En cuanto a la superficie removida la

geoforma de RPI fue la que mayor área presentó (387,015 m<sup>2</sup>), le siguen los LC (192,001 m<sup>2</sup>) y LMC (100,951 m<sup>2</sup>). Las geoformas restantes tuvieron como máximo una remoción de 57,076 m<sup>2</sup> (Tabla 29).

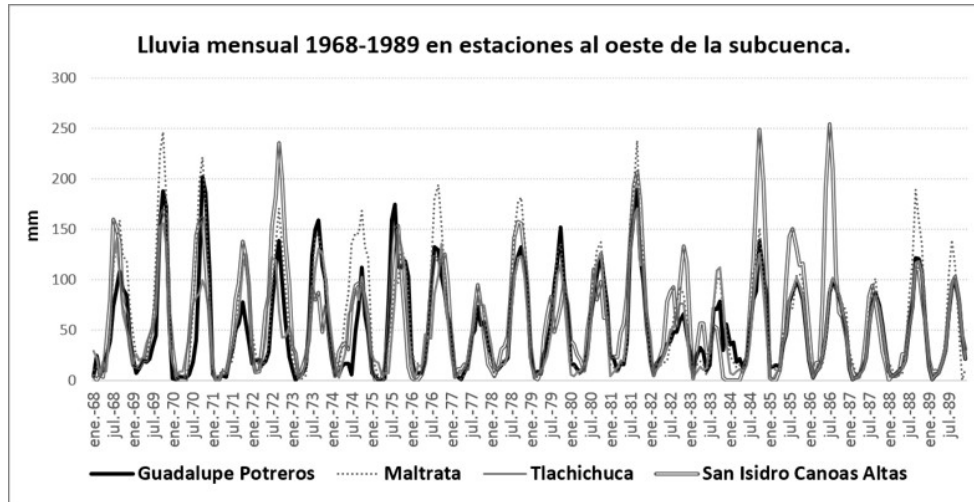
En lo que concierne a la incidencia de procesos gravitacionales por su clasificación, los deslizamientos someros superficiales (Fig. 26c) son los que más veces se presentaron con 228 eventos, siguen los flujos de escombros (Fig. 26e) con 100 eventos y los deslizamientos de escombros (Fig. 26d) con 80 eventos. En el caso del área desplazada fueron las volcaduras y caídas de rocas (Fig. 26a) las que mayor superficie removieron (236,780 m<sup>2</sup>), continúan los deslizamientos someros superficiales (204,672 m<sup>2</sup>) y los flujos de escombros (171,800 m<sup>2</sup>). El resto de los tipos de procesos gravitacionales no superan los 123,79 m<sup>2</sup> (Tabla 29).

En resumen, la geoforma con mayor incidencia y área removida de su cubierta vegetal o uso de suelo es la RPI lo cual responde principalmente a su geología conformada por una intercalación de depósitos de flujos de escoria y pómez y lahares. Así mismo, los eventos que más se observaron en la subcuenca son los deslizamientos someros superficiales los cuales contribuyen a la depositación de material suelto sobre los cauces de las barrancas, mismos que al ser movilizados pendiente abajo durante la temporada de lluvias, representan un peligro para las poblaciones establecidas en el corredor urbano Cecilio Terán-Ciudad Mendoza-Nogales. Sin embargo, el tipo de proceso gravitacional que más área remueve son las volcaduras o caídas de roca, ya que con tan solo 3 de estos eventos ocurridos en la RPI se removieron 133,300 m<sup>2</sup>; dichos eventos desplazaron 90,370 m<sup>2</sup>, 29,330 m<sup>2</sup> y 13,600 m<sup>2</sup> cada uno respectivamente, lo cual representa el 18% de toda el área removida por procesos gravitacionales al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

### **c) Erosividad por lluvias (1968-1989)**

Los datos de lluvia completos equivalen a 22 años por lo que cada estación climatológica se obtuvieron series de 264 registros de precipitación mensual. Es por ello que para determinar si el comportamiento de la precipitación se modifica con el desnivel orográfico que se forma en el Volcán Pico de Orizaba o con su cercanía al océano pacífico, las series de datos se dividieron en las que están alineadas al oeste y las que están alineadas al este. Los resultados en el caso de las estaciones climatológicas que se ubican al oeste muestran que en la mayoría de los años, la temporada de lluvias comienza en mayo y termina en octubre, siendo julio el mes en que mayor intensidad tienen las precipitaciones. La estación Maltrata tuvo un promedio mensual para los meses de lluvia de 108.2 mm con la precipitación más intensa en junio de 1981 con 423 mm, y le

sigue la estación San Isidro Canoas con un promedio de 104.3 mm y la lluvia más alta en mayo de 1986 con 390.7 mm; la estación Guadalupe Potreros mostró un promedio de 89.15mm con la lluvia más fuerte de 351 mm en agosto de 1969 y en la estación Tlachichuca el promedio fue de 87.22 mm con el episodio de más lluvia (285 mm) de lluvia también en el mes de agosto de 1969 (Fig. 43).



**Figura 43.** Promedio móvil de precipitación al oeste de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

En cuanto a las estaciones climatológicas ubicadas al este de la subcuenca, la estación Naranjal CFE tuvo un promedio mensual para los meses de lluvia de 219.1 mm con la precipitación más fuerte de 1068 mm y Sumidero con un promedio de 178.14mm y la lluvia más intensa de 829.61 mm. Ambas alcanzaron esas precipitaciones en septiembre de 1988. Por su parte, la estación Chilapa mostro un promedio de 253.36 mm y su precipitación más alta con 760.4 mm en el mes de agosto de 1969, en tanto que la estación Tetelzingo obtuvo un promedio de 148.94 mm y logro la lluvia más alta con 724 mm en octubre de 1987. Al igual que las estaciones que se localizan al oeste de la subcuenca, la temporada de lluvias comienza en mayo y termina en septiembre, siendo julio el mes con mayor intensidad de lluvias (Fig. 44).

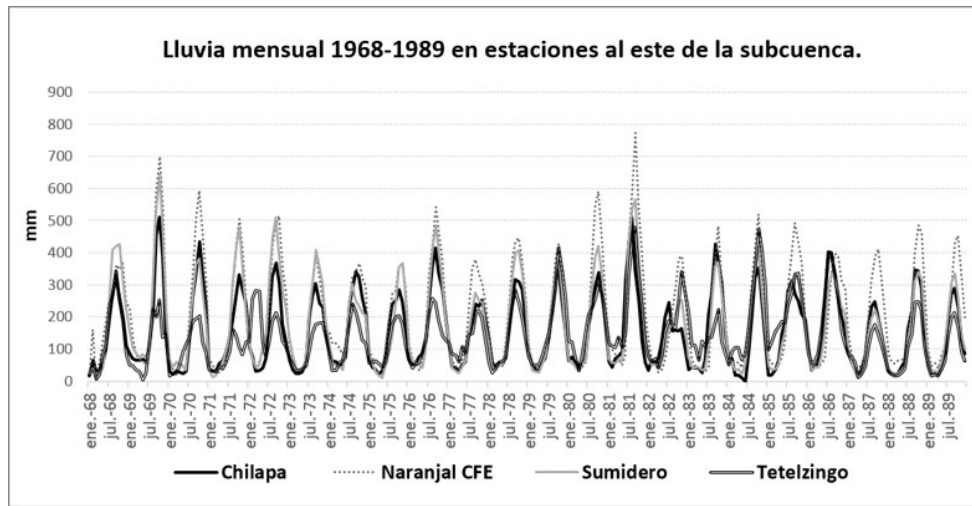
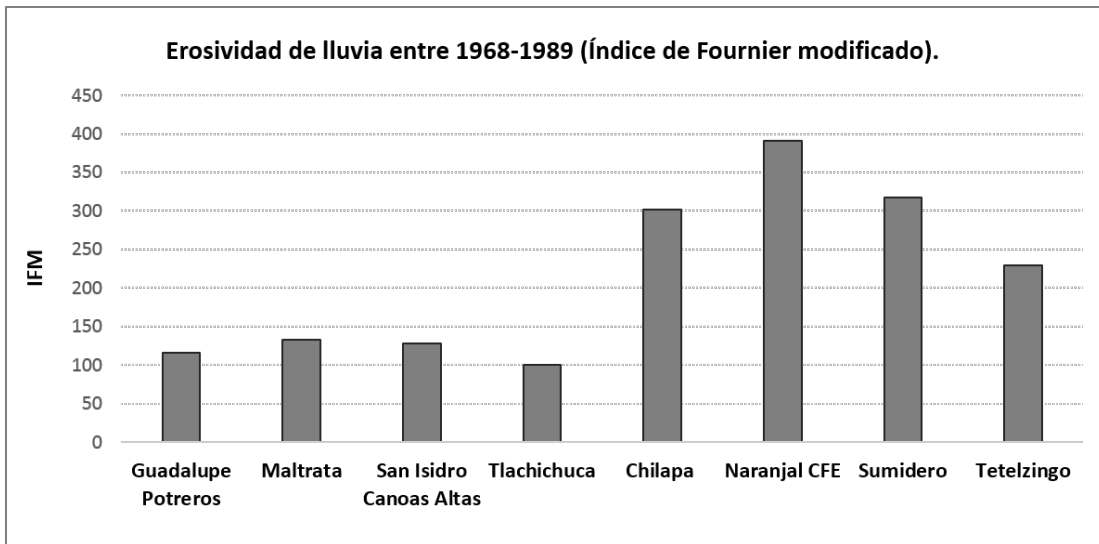


Figura 44. Promedio móvil de la precipitación al oeste de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

En términos generales, se observó que las estaciones climatológicas alineadas al este de la subcuenca muestran valores más altos respecto a las que se ubican al oeste, la temporada de lluvias ocurre entre los meses de mayo a octubre, siendo el mes de julio el que más precipitación aporta para ambos grupos de estaciones climatológicas.

- **Distribución de la erosividad.**

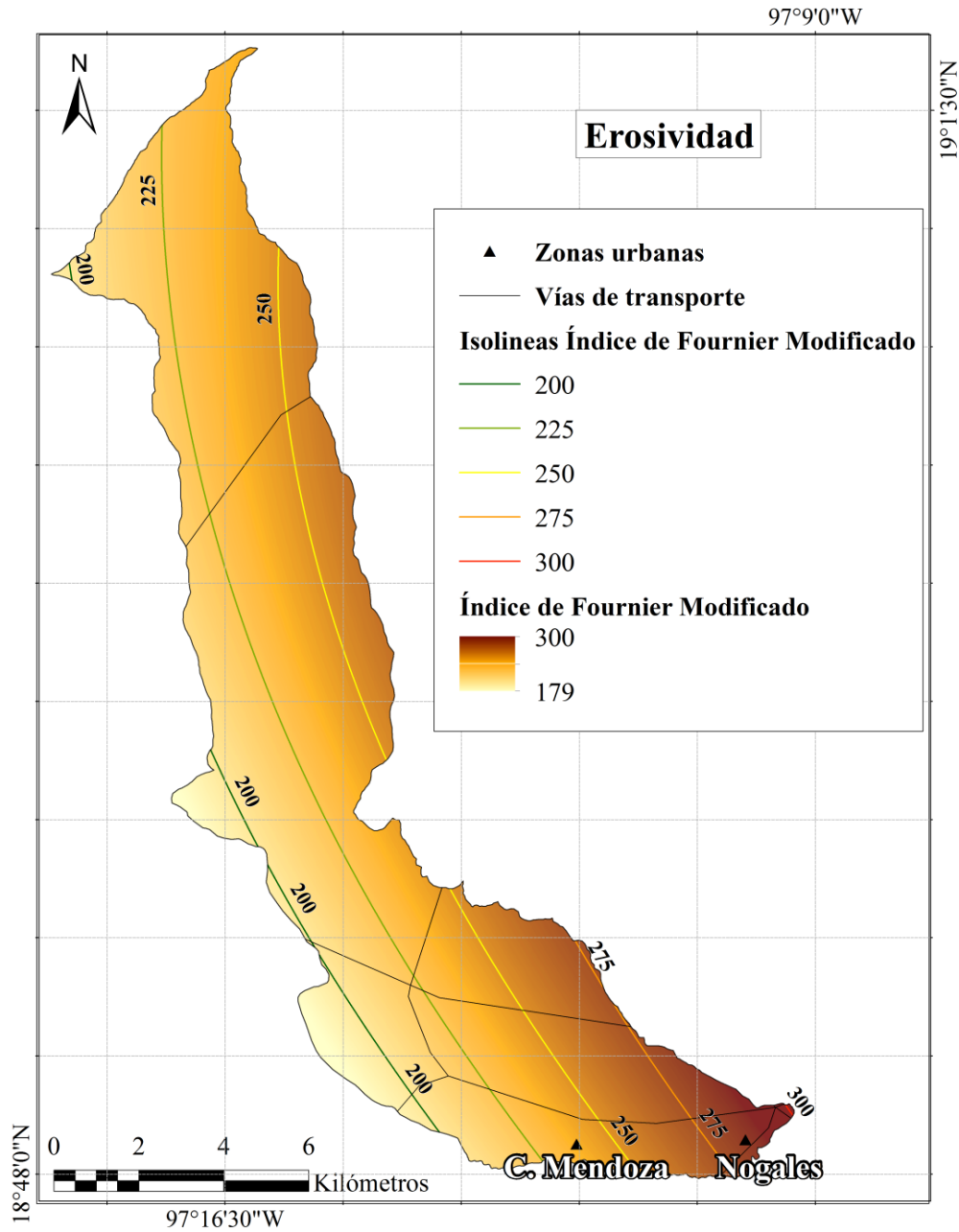
El índice de Fournier modificado calculado a partir de lluvias históricas entre 1968-1989 muestra que, en las estaciones climatológicas cercanas a la subcuenca, la erosividad alcanza rangos de moderado a muy alto. Las estaciones que se encuentran al oeste de la subcuenca mostraron un rango alto (120-160) y moderado (90-120) en el índice de Fournier modificado; en ellas se incluyen a las estaciones Maltrata con 132.65, San Isidro Canoas con 127.89 y Guadalupe Potreros con 115.77 con rango alto y solo la estación Tlachichuca (100.52) tuvo un rango moderado. En tanto que las estaciones con el índice de Fournier modificado que presentan un rango muy alto (>160) son Naranjal CFE con un valor de 391.23, le siguen Sumidero con 317.33, Chilapa con 302.1 y Tetelzingo con 228.8; todas ubicadas al este de la subcuenca (Fig. 45).



**Figura 45.** Erosividad en estaciones cercanas a la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

Los resultados en la distribución de la erosividad en los depósitos por el impacto de las precipitaciones tienen valores muy altos en la escala del índice de Fournier modificado (179-300). En el mapa de erosividad se muestra que en el sector sureste ocurre la erosividad más fuerte de toda la subcuenca, siendo las geoformas de LC y LMC las más afectadas, en tanto que la menor erosión se puede esperar en una pequeña región al noroeste y en un área considerable del suroeste, sobre algunos depósitos de CLSN, LB y LC. En el resto de la subcuenca los valores van de 220 a 260 en el índice de Fournier modificado, lo que significa que esos depósitos también estarán afectados durante la temporada de lluvias, pero en un grado menor que los depósitos del sureste (Fig. 46).

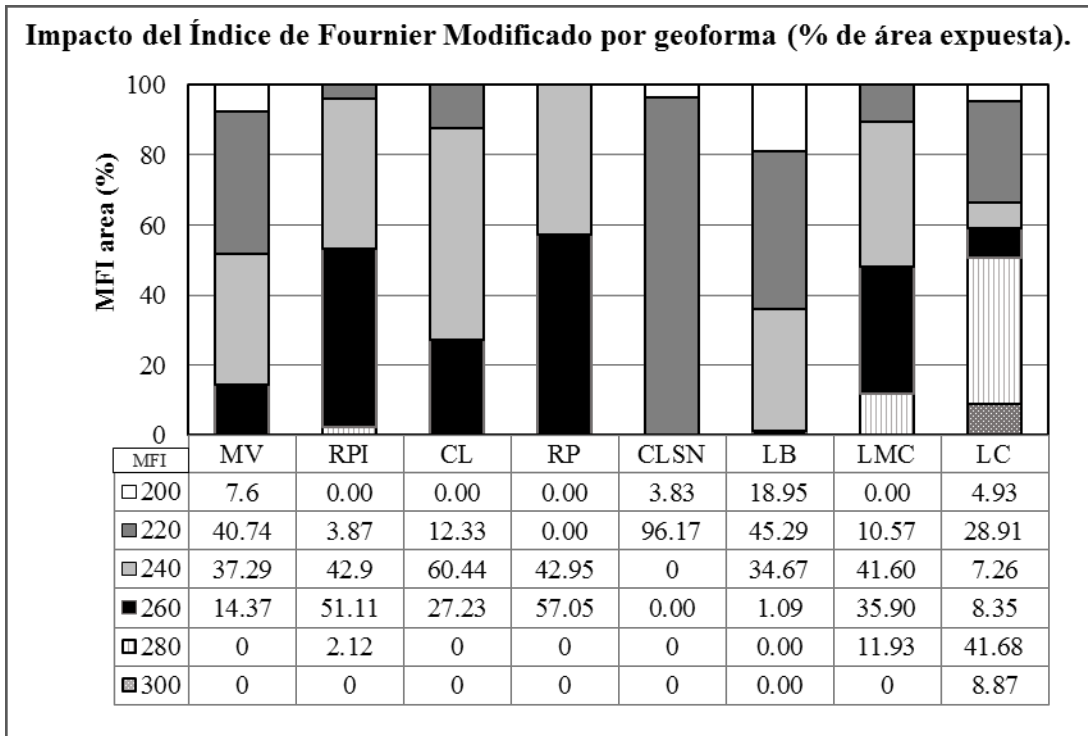




**Figura 46.** Erosividad por precipitaciones al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

Aunque todas las geoformas tienen valores muy altos de erosividad, si existe una diferencia en el impacto erosivo que recibe cada geoforma, siendo CLSN la geoforma que menor impacto erosivo tiene al presentar el 95.8% de su área total con índice de 220. El aumento de erosividad de 220 a 240 se muestra para las geoformas MV y los LB que cubren de 34.67 a 45.25% de su área total. La erosividad es mayor en las geoformas CL, RP, RPI y LMC con valores dominantes de 240 a 260 y que cubren de 35.09 a 60.44% del área total. Finalmente, los LC son los más impactados por la

erosividad pluvial al tener un 41.68% del área total con valores de 280 en el índice de Fournier modificado (Fig. 47).



**Figura 47.** Porcentaje de áreas erosionables al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

La distribución de la erosividad reafirma los resultados de precipitación histórica, al mostrar que las áreas al este de la subcuenca son las que presentan lluvias con mayor intensidad y por ende se puede inferir que habrá más erosión por precipitación respecto a las zonas que se encuentran al oeste de la subcuenca. Por otro lado, la erosividad por acción de las lluvias muestra valores muy altos en la escala de erosividad del índice de Fournier modificado (179-300), lo que evidencia que la precipitación contribuye de forma importante en la formación de procesos gravitacionales, ya que la ubicación de la segunda geoforma (LC) con más área desplazada a causa de los procesos gravitacionales (192,001 m<sup>2</sup>) y mayor área expuesta a valores altos de erosividad se ubica en el extremo este de la subcuenca.

**d) Áreas asociadas con la inestabilidad ladera por cambio de uso de suelo (2012)**

A continuación, se presenta el análisis de cada variable y su influencia para geoforma evaluada, asimismo se presentan los resultados de la sobreposición difusa para uso de suelo actual, para inestabilidad de laderas y para las áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual.

i) **Comportamiento de las variables asociadas a uso de suelo actual y a inestabilidad de ladera.**

En este estudio se analizaron 32 variables en campo que fueron agrupadas en uso de suelo e inestabilidad de laderas. Cabe mencionar que a partir de este apartado, se siguió un orden altitudinal de las geoformas al interior de gráficos y tablas con la finalidad de facilitar la interpretación y comparación paisajística de los datos. Siendo así, los resultados del análisis descriptivo de cada una de las variables se presentan en dos formatos, uno visual recurriendo a mapas de distribución para variables binomiales; y uno de gráficas de caja para variables cuantitativas discretas y continuas.

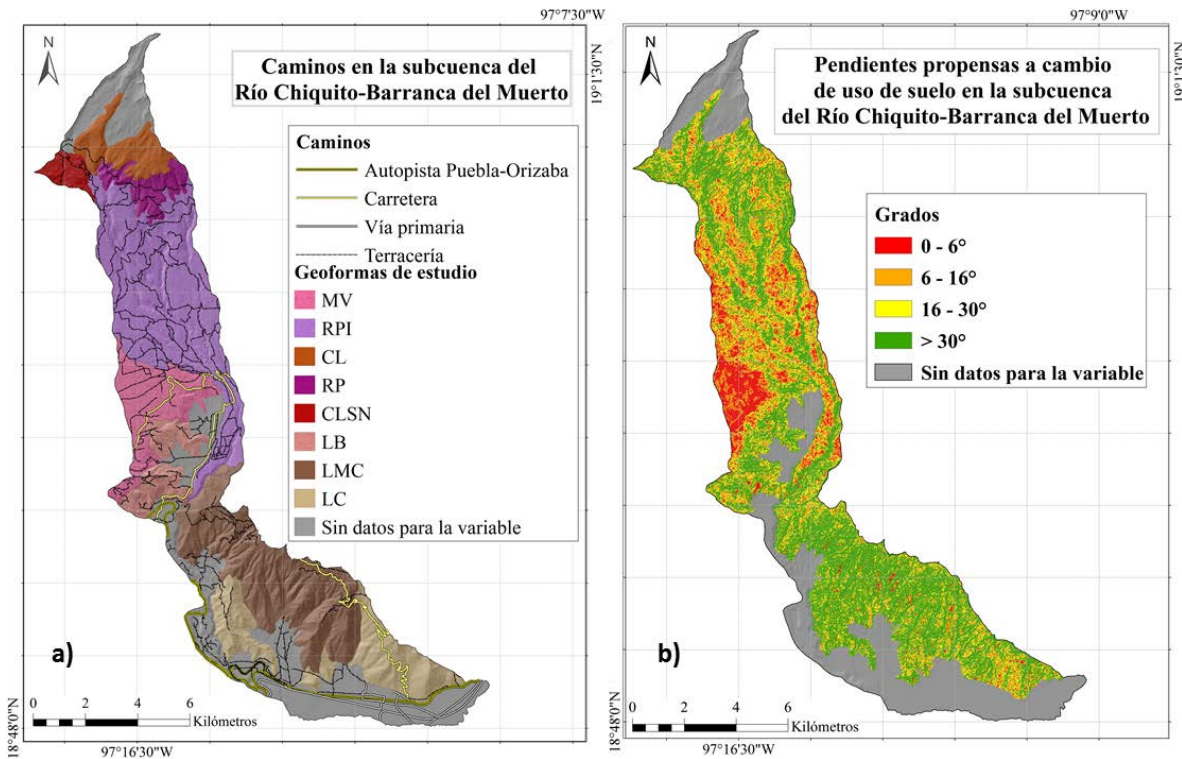
• **Variables asociadas al uso de suelo.**

Para determinar que atributos del ambiente favorecen un cambio de uso de suelo, se analizaron 21 variables asociadas con la accesibilidad, fertilidad del suelo y prácticas forestales. Cada una de ellas se analiza por geoforma y estos son los resultados:

**Accesibilidad.**

Este rubro cuenta con dos variables la presencia de caminos y las pendientes menores a 30°. En cuanto a los caminos, al interior de la subcuenca se observa el paso de la autopista Puebla-Orizaba y dos carreteras que conectan a Ciudad Mendoza con poblaciones al exterior de la subcuenca. En el resto del área de estudio existe una red de terracerías y brechas bien comunicadas entre sí y que se utilizan como principal acceso a las parcelas agrícolas y actividades forestales. La mayoría de las poblaciones se encuentran pavimentadas (vías primarias), excepto Chichipica y San Juanero que son pequeñas comunidades con pocas casas de piso de tierra que no han delimitado calles aun (Fig. 48a).

Se tomó en cuenta que las inclinaciones menores a 30° están más asociadas a un cambio de uso de suelo, lo anterior debido a que observaciones en campo indicaron que tanto los usos de suelo agrícolas como las áreas urbanas se establecen en esas pendientes. Las áreas con mayor extensión de pendientes menores a 30° se ubican en las geoformas MV y RPI, en el resto de las geoformas es más común encontrar pendientes mayores a los 30° (Fig. 48b).



**Figura 48.** Accesibilidad en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto. a) Caminos. b) Pendiente.

La delimitación de todos los caminos al interior de la subcuenca da cuenta de lo fácil que es acceder a prácticamente todos los sitios con vegetación natural, por tanto, las geoformas que aún la conservan están más propensas a su aprovechamiento y posterior cambio de uso de suelo. Una limitante para que lo anterior no ocurra es la presencia de procesos gravitacionales que en ocasiones impiden el libre desplazamiento, sin embargo, esto solo es temporal ya que posteriormente los caminos son rehabilitados.

En cuanto a la distribución de la pendiente, las actividades agrícolas serán más factibles en las geoformas MV y RPI, tal como ocurre actualmente, sin embargo, otros usos de suelo como las actividades forestales y pecuarias también pueden presentarse en pendientes mayores pero al ser menos invasivas no influyen en un nuevo uso de suelo a corto plazo, no obstante el disturbio que producen puede ir incrementando y eventualmente ocasionar un futuro cambio de uso de suelo en el resto de las geoformas.

La accesibilidad es muy alta en función de que presenta vías de comunicación que solo se diferencian en cuanto a la rapidez con la que se puede fluir en ellas, pero no a su imposibilidad de desplazamiento. Por otro lado, el tener un área con fuertes pendientes representa una limitante en la

accesibilidad a zonas de vegetación natural, sin embargo, no es garantía de que dichas zonas sean propensas a un cambio de uso de suelo menos agresivo que el agrícola.

### Fertilidad de los suelos.

Al interior de la subcuenca el mayor cambio de uso de suelo que ha modificado y fragmentado el paisaje es el uso de suelo agrícola, es por ello que se considera el principal factor de cambio en las cubiertas que conforman la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto. Con base en ello se infiere que el cambio de uso de suelo es mayor en áreas con propiedades edáficas que permitan el óptimo crecimiento de las plantas cultivadas, es por ello que se evaluó la estructura y calidad de los suelos.

#### - *Estructura edáfica.*

Dado que la disponibilidad de agua contribuye al crecimiento de las plantas, se buscaron cualidades relacionadas con la estructura de los suelos y su capacidad para proveer agua, las cuales garantizaran el crecimiento óptimo de la vegetación natural y que con ello representarían una posibilidad para el desarrollo de los cultivos agrícolas. Por ello se tomaron variables relacionadas con la estructura del suelo, las cuales pueden facilitar o imposibilitar la fluidez del agua en su interior (capacidad de agua disponible, capacidad de aireación, capacidad de campo y volumen total de poros).

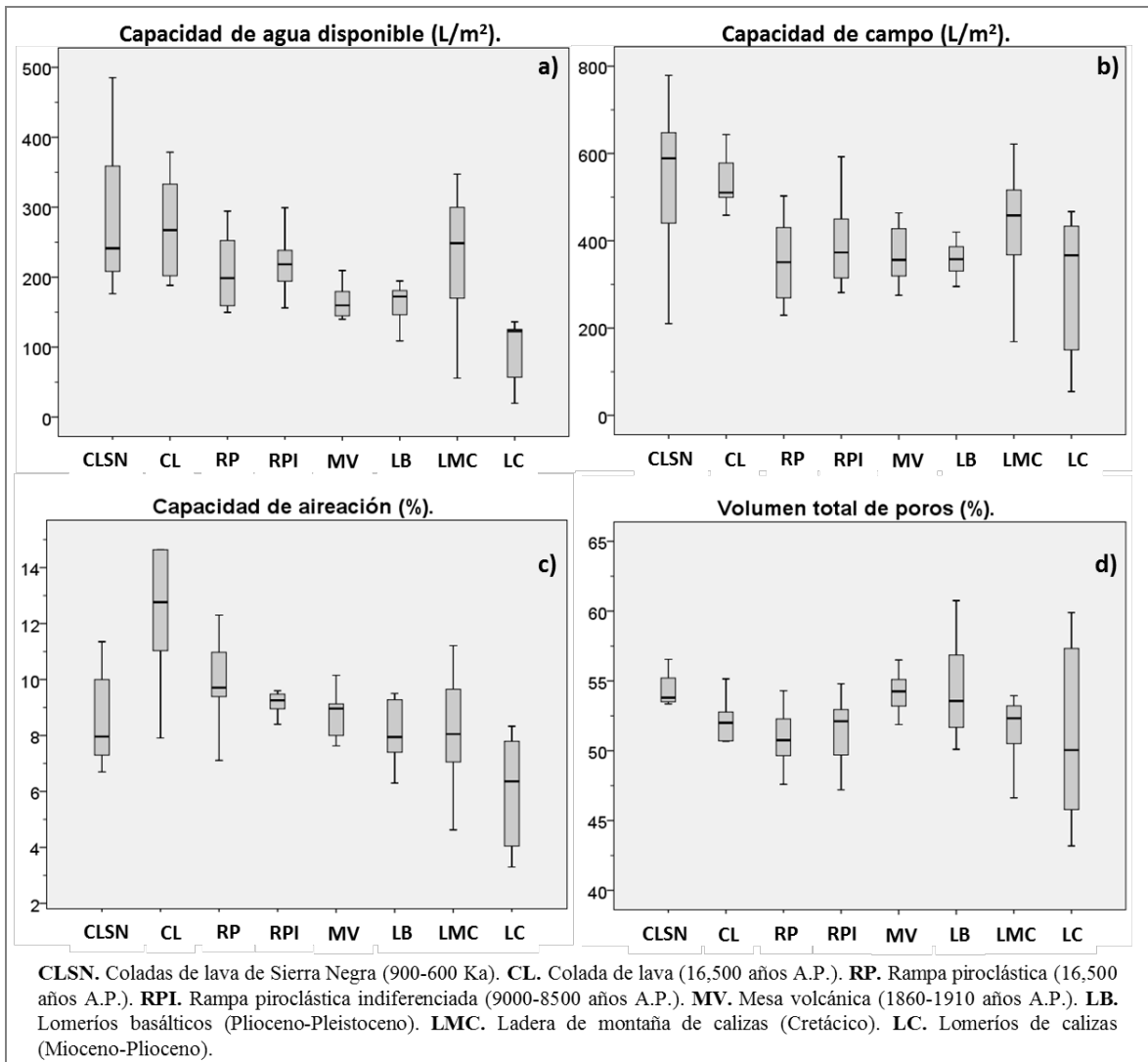
En la capacidad de agua disponible o agua que puede ser absorbida por las raíces de las plantas, los suelos de la geoforma CLSN tuvieron el punto de muestreo con mayor disponibilidad de agua (485 L/m<sup>2</sup>) y una mínima de 176 L/m<sup>2</sup>; le siguen las geoformas de CL (188-379 L/m<sup>2</sup>); y la geoforma LMC (55-347 L/m<sup>2</sup>). Otra geoforma que destaca, pero por la poca variabilidad en los datos es la de LB, en ella se observó un rango de 109-195 L/m<sup>2</sup>. Por otro lado, la geoforma con menor agua disponible en la subcuenca es la de LC con un rango de 20-136 L/m<sup>2</sup>. El resto de las geoformas muestran similitudes en el comportamiento de sus valores presentando un rango de 142 a 299 L/m<sup>2</sup> (Fig. 49a). De acuerdo con la evaluación para capacidad de agua disponible de Siebe et al., 2006, la mayoría de los suelos muestreados presentan valores muy altos (mayores a 200 L/m<sup>2</sup>), las únicas excepciones se dan en algunos suelos de la LMC y en todos los de LC.

La capacidad de campo muestra comportamientos visuales de los datos de las geoformas muy similares a la capacidad de agua disponible. Las geoformas en la subcuenca muestran valores de muy bajos en algunos sitios de los LC a muy altos en puntos de las CLSN, CL, RPI y LMC. Así, la

geoforma con valores más altos con cierta uniformidad en capacidad de campo es la de CL (439-643 L/m<sup>2</sup>). No obstante, las CLSN posee el valor más alto registrado para la subcuenca, pero también un amplio rango entre los valores mínimos y máximos (210-779 L/m<sup>2</sup>); le siguen la geoforma de LMC (169-621 L/m<sup>2</sup>) y la geoforma de RPI (281-593 L/m<sup>2</sup>). La geoforma de LC presento una alta variabilidad en los datos y los puntos de muestreo con registros más bajos para la subcuenca (54-467 L/m<sup>2</sup>). También destaca la geoforma de LB por la poca variabilidad de sus datos (295-420 L/m<sup>2</sup>). Por último, las geoformas de RP y MV presentan una similitud en la variabilidad de sus datos con rangos de 229-502 L/m<sup>2</sup> y 275-464 L/m<sup>2</sup> respectivamente (Fig. 49b).

En cuanto a la capacidad de aireación o espacio relativo ocupado por los poros, los suelos con más capacidad de aireación se ubican en la geoforma de CL (7.91-14.64%), le siguen los de RP (7.11-12.3%), CLSN (6.7-11.35%) y LMC (4.63-11.21%). La menor capacidad de aireación se da en la geoforma de LC (3.60-8.33%) y los suelos con valores más similares están en la geoforma RPI (8.4-9.6%). Las geoformas de MV (7.63-10.15%) y LB (6.3-9.5%) presentan similitudes en sus rangos (Fig. 49c). La evaluación indica que en la geoforma de LC se presentan suelos con valores bajos en capacidad de aireación, en tanto que en la CL se observaron puntos con valores altos.

Finalmente, en cuanto al volumen total de poros la geoforma que más porosidad presenta es la de LB (50.10-60.75%) y le continúan LC (43.18-60%). Ambas geoformas presentan considerable variabilidad en sus datos. Por otra parte, los suelos más uniformes y con valores relativamente altos de porosidad son los de la geoforma CLSN (53.36-56.5%), MV (51.88-56.5%) y CL (50.7-55%). Las geoformas de RP (47.6-54.3%), RPI (47.2-54.8%) y LMC (46.6-54%) presentan rangos de porosidad parecidos (Fig. 49d). La evaluación del volumen total de poros que propone Siebe et al., 2006, muestra que en la subcuenca se presentan suelos con valores bajos para la geoforma LC y muy altos en suelos de los LB.



**Figura 49.** Fertilidad estructural del suelo al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

Al hacer un análisis de aptitud del suelo en cuanto a la fertilidad por estructura del suelo destaca la geoforma de CLSN, ya que sus suelos poseen valores altos de agua disponible para ser absorbida por las plantas y también valores altos de capacidad de campo que sugieren que la vegetación tendrá agua tiempo después de la temporada de lluvias. Su capacidad de aireación evidencia que se tiene un buen intercambio de gases y poca erosión del suelo al permitir el drenaje pluvial, además sus altos valores del volumen total de poros indican que la compactación del suelo es baja lo que también contribuye al buen flujo de agua y aire en su interior. Cabe destacar que los suelos de la geoforma de CLSN, presentan una alta variabilidad en los valores de los sitios de muestreo respecto a la capacidad de agua disponible, capacidad de campo y capacidad de aireación. Dado que estas

variables se calculan a partir de la textura, densidad aparente y materia orgánica, y si tomamos en cuenta que tanto la geología (por flujos de lava andesita basáltica y andesíticas) como la vegetación (pastizal de alta montaña y bosque de coníferas) es prácticamente la misma, se puede inferir que existen diferentes procesos pedogenéticos dentro de la misma geoforma. Tales procesos pueden responder por un lado al continuo aporte heterogéneo de agua resultado de la presencia/ausencia de nieve el cual interactúa con los procesos químicos derivados de la descomposición de la materia orgánica, y también a que esta geoforma presenta un relieve con valles y crestas interfluviales que definitivamente intervienen en la acumulación de los sedimentos y la posterior formación de suelos.

Otra geoforma que destaca por tener una buena fertilidad por estructura de suelo es la CL. Esta geoforma muestra valores altos en su capacidad de agua disponible, capacidad de campo y capacidad de aireación, lo cual sugiere que poseen suelos bien aireados con un buen transporte de agua en su interior durante la temporada de lluvias, así como también una buena retención de agua en los meses siguientes, misma que se complementa con la baja compactación en suelo.

La LMC también presenta una buena fertilidad en la estructura de sus suelos, la cual se refleja en altos valores de capacidad de agua disponible, capacidad de campo y capacidad de aireación; que al igual que los suelos de las geoformas anteriores mostrara una eficiencia en el transporte de agua y gases en su interior, y de una buena retención de agua después de la temporada de lluvias. Sin embargo, dado que se observaron algunos valores con evaluación media en el volumen total de poros se puede inferir que existen suelos con moderada compactación, lo cual podría interferir con el buen funcionamiento hídrico en sus suelos.

En el caso de la geoforma de LC se observan puntos de muestreo con los datos más bajos de toda la subcuenca, estos suelos poseen evaluaciones muy bajas en la capacidad de agua disponible y capacidad de aireación, muy bajas en capacidad de campo y medias en volumen total de poros. Lo anterior se traduce en que esta geoforma presenta algunos suelos con poco flujo de agua aprovechable por las plantas en su interior, poco intercambio de gases, poca retención de agua posterior a la temporada de lluvias y una considerable compactación en sus suelos; si bien no son representativos de toda la geoforma dado que existen otros suelos con evaluaciones de medias a altas en las variables antes mencionadas, si son suelos con poco soporte para la vegetación, mayor propensión a la erosión superficial e incluso a los procesos gravitacionales por su propensión al estancamiento del agua durante la temporada de lluvias.



- *Calidad edáfica.*

La calidad de los suelos es fundamental para la decisión de realizar un cambio de uso de suelo, ya que los suelos bien nutridos son primordiales para obtener cosechas de calidad. Dado lo anterior se buscaron cualidades relacionadas con la calidad de los suelos y el funcionamiento de algunos macronutrientes indispensables en desarrollo de las plantas silvestres o agrícolas (bases intercambiables, fósforo, nitrógeno total y humus).

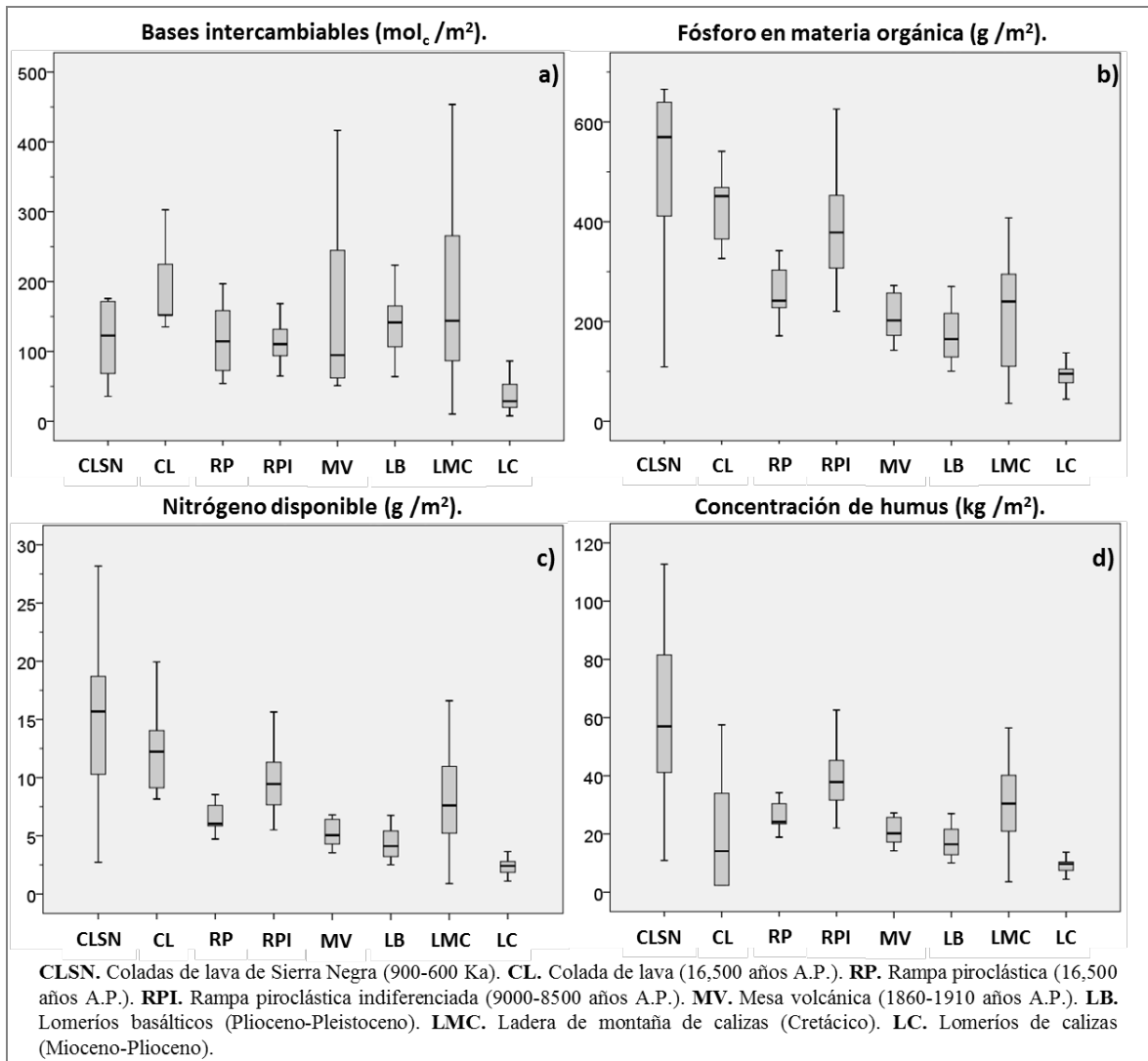
En las bases intercambiables se ubican los cationes de Ca, Mg, K y Na que pueden ser aprovechados por las raíces de las plantas. La geoforma CL presenta valores de altos a muy altos en sus puntos de muestreo (135–303 mol<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>), no obstante, la geoforma de LMC posee el punto con mayor concentración de bases intercambiables (453 mol<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>) pero también una variabilidad considerable al presentar valores desde 10 mol<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>. Con valores altos y notable variabilidad le sigue la geoforma de MV (51-417 mol<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>). Las geoformas CLSN (36-176 mol<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>), RP (54-197 mol<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>) y LB (63-224 mol<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>) tienen rangos de valores similares, en tanto que las geoformas con menor variabilidad son las de RPI (65-169 mol<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>) y LC (8-86 mol<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>), siendo esta última la geoforma con el valor de muestreo más bajo. La evaluación para bases intercambiables muestra que al interior de la subcuenca hay disponibilidad de bases intercambiables de baja a muy alta (Fig. 50a).

La presencia de fósforo en materia orgánica es vital para la formación de ácidos nucleicos y fosfolípidos, para el metabolismo en la hidrólisis del pirofosfato y enlaces de fosfato orgánico, su deficiencia se traduce en la pérdida de hojas, necrosis y lento desarrollo/crecimiento de las plantas (Bidwell, 1979). La geoforma con el rango de valores más altos y amplios es la CLSN (109-665 g/m<sup>2</sup>), en una situación similar se ubica la RPI (221-626 g/m<sup>2</sup>) y la CL (327-541 g/m<sup>2</sup>) que además de los valores altos también posee una menor variabilidad. En el caso de las geoformas RP (171-342 g/m<sup>2</sup>), MV (142-272 g/m<sup>2</sup>) y LB (100-270 g/m<sup>2</sup>) se observan rangos similares en sus concentraciones de fósforo orgánico. Finalmente, los valores más bajos en abastecimiento de fósforo en materia orgánica se ubican en algunos puntos de muestreo de la LMC (36-408 g/m<sup>2</sup>) y en la mayoría de los datos en los LC (45-137 g/m<sup>2</sup>). Se observa que en la subcuenca los datos de abastecimiento de fósforo en materia orgánica van de bajos en la región con rocas calizas (LMC y LC) a muy altos en las CLSN y RPI (Fig. 50b).

En cuanto al nitrógeno disponible, este representa el constituyente de proteínas y ácidos nucleicos estructurales y metabólicos en las plantas, si se ve limitado estas se muestran pálidas y con pocas ramificaciones al estar inhibidas las yemas de crecimiento (Bidwell, 1979). La geoforma de CLSN

(3-28 g/m<sup>2</sup>) posee una variabilidad amplia que también incluye a los puntos de muestreo con mayor nitrógeno disponible, le siguen la CL (8-20 g/m<sup>2</sup>), la LMC (1-17 g/m<sup>2</sup>) y la RPI (6-16 g/m<sup>2</sup>). En las geoformas RP (5-9 g/m<sup>2</sup>), MV (4-7 g/m<sup>2</sup>) y LB (3-7 g/m<sup>2</sup>) se ubican puntos de muestreo con rangos equivalentes. Por último, la geoforma de LC (1-4 g/m<sup>2</sup>) es donde se encontraron los valores más bajos y homogéneos de abastecimiento de nitrógeno disponible. De acuerdo con el análisis, el abastecimiento de nitrógeno disponible va de muy bajo en LC a altos en las CLSN (Fig. 50c).

En el caso de la concentración de humus, esta habla de los procesos pedogénéticos que se expresan en los suelos, así como de los procesos erosivos que generen una pérdida del suelo superficial. Los valores más altos de humus se ubican en la geoforma CLSN (11-113 kg/m<sup>2</sup>), la cual también presenta una amplia variabilidad en sus datos; con datos similares se encuentran las geoformas de RPI (22-63 kg/m<sup>2</sup>), LMC (4-56 kg/m<sup>2</sup>) y CL (2-58 kg/m<sup>2</sup>). Estas dos últimas también destacan por presentar valores muy bajos de concentración de humus en algunos de sus puntos de muestreo. En las geoformas de RP (19-34 kg/m<sup>2</sup>), MV (14-27 kg/m<sup>2</sup>) y LB (10- kg/m<sup>2</sup>) se observa una similitud con menor variabilidad de los datos, en tanto que los LC (4-14 kg/m<sup>2</sup>) es la geoforma con los valores más homogéneos en concentración de humus (Fig. 50d).



**Figura 50.** Fertilidad (calidad del suelo) al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

Se observa que las CLSN presentan suelos con alta variabilidad en la concentración de nutrientes, poseen los valores más altos de fósforo en materia orgánica, nitrógeno disponible y concentración de humus de toda la subcuenca, sin embargo, también tiene suelos poco nutridos. Lo anterior puede deberse a su morfología con valles y crestas que conducen a la presencia diferencial de agua de nieve, que en algunos sitios puede favorecer la descomposición de materia orgánica y mineral, pero en otros producir un anegamiento que podría derivar en un ambiente anóxico, limitante para organismos aerobios que se encargan de la integración de materia orgánica a los suelos.

Las CL tienden a tener suelos con evaluaciones en sus nutrientes de medianas a altas en bases intercambiables, fósforo en materia orgánica y nitrógeno disponible. En esta geofoma también se muestran sitios con valores de baja a mediana concentración de humus lo cual puede ser resultado

de la lenta composición del mantillo Moder que para esta zona está compuesto principalmente por acículas de pinos.

Otra geoforma con evaluaciones de medianas a altas en bases intercambiables, fósforo en materia orgánica, nitrógeno disponible y concentración de humus es la RPI, la cual a pesar de tener muy pocas áreas de vegetación natural, estas presentan una buena disponibilidad de nutrientes para las plantas, lo que se traduce en una potencial ampliación de áreas agrícolas a estos espacios.

La MV registro valores de medianos a muy altos en bases intercambiables y fósforo en materia orgánica, y bajos a medios en nitrógeno disponible y concentración de humus. Esta geoforma es una de las más afectadas por las prácticas agrícolas lo cual se ve reflejado en valores altos de bases intercambiables que responden a la acidez de los suelos, y en las bajas concentraciones de humus.

En la LMC la variabilidad en la calidad de suelos es evidente, en el caso de las bases intercambiables va de mediana a muy alta. Esto se explica por el origen carbonatado de sus depósitos geológicos. En esta geoforma el fósforo en materia orgánica tiene valores de bajo a muy alto que se pueden atribuir al alto intemperismo de los materiales. En el nitrógeno disponible y la concentración de humus se observaron valores de bajos a medianos, lo que indica una poca actividad de organismos integradores de materia orgánica a los suelos. Los valores de calidad de los suelos de esta geoforma son los más bajos de toda la subcuenca, lo cual se puede relacionar con el poco espesor de los suelos, la vegetación perturbada y al manejo agrícola que están implementando en algunas áreas.

#### Prácticas forestales.

Antes de que ocurra un cambio definitivo de uso de suelo en zonas forestales, estas se ven afectadas por prácticas extractivas que alteran sus órdenes ecosistémicos naturales, dichas prácticas representan un disturbio continuo en los bosques o fragmentos de bosques. Con el paso del tiempo este disturbio puede derivar en la pérdida de la composición vegetal, pérdida de biomasa y pérdida de nichos ecológicos con lo cual se rompe la estructura interna de estos ecosistemas, y con ello se alteran los materiales edáficos y geológicos que quedan expuestos a los procesos erosivos. Siendo así, en este apartado se evalúa el recurso potencial, el aprovechamiento forestal y la intervención forestal.

##### - *Recurso potencial arbóreo.*

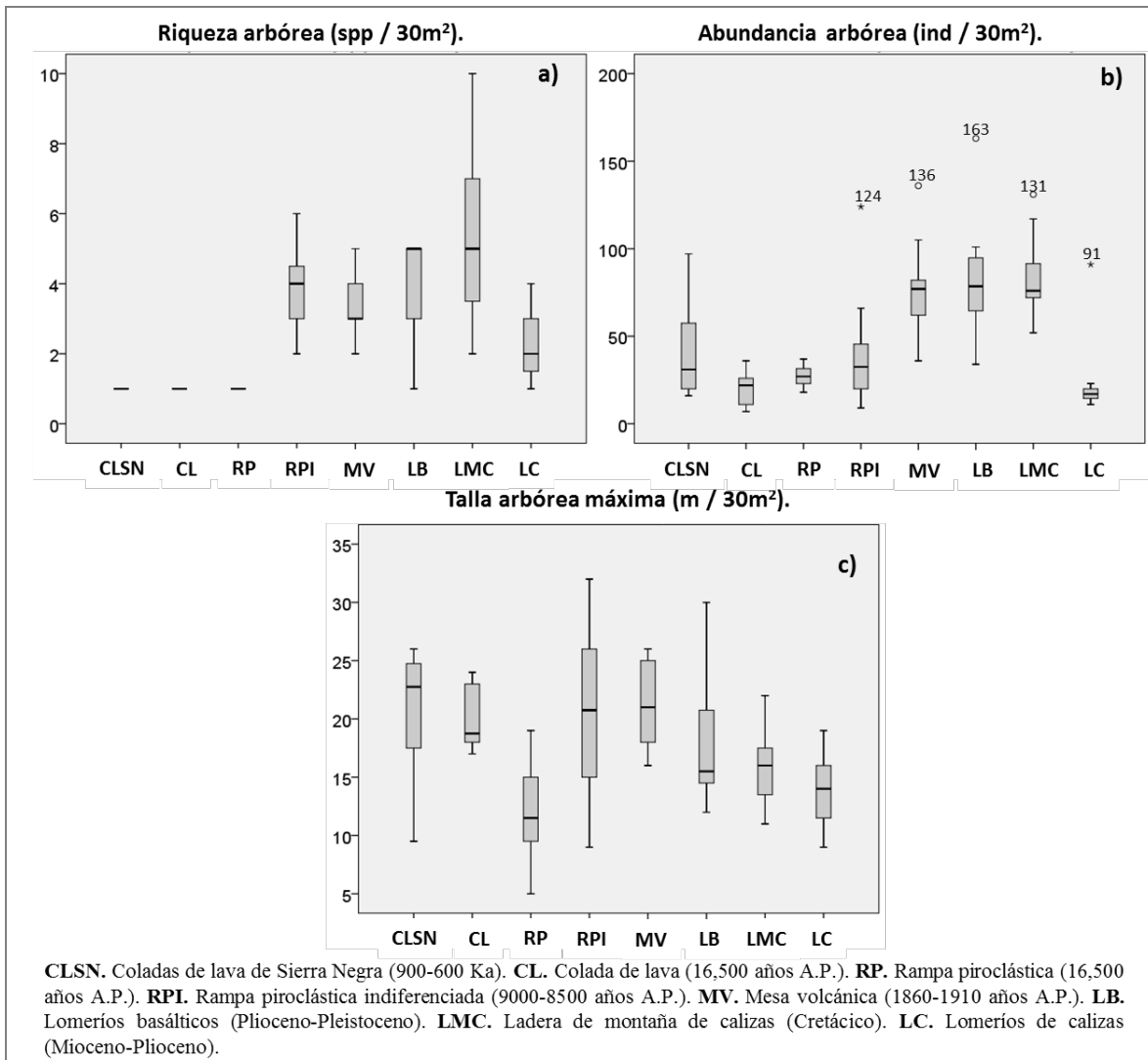
Para conocer los impactos por cambio de uso de suelo en la vegetación natural, se procedió a conocer la composición de los recursos forestales en función de su riqueza, abundancia y talla

arbórea máxima (Fig. 62). Siendo así, la geoforma con mayor riqueza arbórea fue la LMC con un rango de 2 a 10 especies por cuadrante. Las especies que se reportan para estos cuadrantes son *Alnus jorullensis*, *Alnus firmifolia*, *Arbutus xalapensis*, *Buddleia* sp., *Cedrela* sp., *Juniperus deppeana*, *Pinus leiophylla*, *Pinus patula*, *Prunus serotina*, *Quercus candicans*, *Quercus castanea* y *Quercus peduncularis*. Otra geoforma que presenta una diversidad de especies considerable es la RPI con un rango de 2 a 6 especies (*Abies religiosa*, *Abies hickelii*, *Alnus jorullensis*, *Alnus firmifolia*, *Arbutus xalapensis*, *Buddleia* sp., *Pinus leiophylla*, *Pinus patula*, *Quercus oleoides*, *Quercus glabrescens* y *Quercus laurina*). La MV (2-5 especies) y LB (1-5 especies) presentan en sus cuadrantes un rango de riqueza similares y la incidencia de las especies *Alnus jorullensis*, *Alnus firmifolia*, *Arbutus xalapensis*, *Pinus leiophylla*, *Pinus patula*, *Prunus serotina*, *Quercus glabrescens* y *Quercus laurina*. La geoforma de LC tiene un rango de 1 a 4 especies por cuadrante. En estos depósitos se encontró una diversidad de vegetación igual a la de la LMC, sin embargo, la coincidencia de las mismas por cuadrante es muy baja. Finalmente, en los puntos de muestreo de las geoformas CLSN, CL y RP solo se encontró a la especie *Pinus hartwegii*, no obstante, en las zonas de contacto entre la RP y la RPI se observó la presencia de *Abies religiosa*, *Abies hickelii*, *Pinus ayacahuite* y *Pinus pseudostrobus*, pero no pudieron ser incluidos al encontrarse en fragmentos de bosque menores a 30 m<sup>2</sup> (Fig. 51a).

En cuanto a la abundancia arbórea, se observan valores atípicos y valores extremos en las geoformas de RPI, MV, LB, LMC y LC; estos datos corresponden a los fragmentos de bosque reforestado que también se incluyeron en este estudio debido a su alta incidencia en la mayoría de las geoformas.

La geoforma con mayor abundancia de árboles es la de LB (34-163 individuos), le siguen la MV (36-136 individuos), la LMC (52- 131 individuos) y la CLSN (16-97 individuos). Las geoformas de RPI (9-124 individuos) y LC (11-91), poseen algunos valores altos en abundancia, sin embargo, en la mayoría de los puntos de muestreo (93.75% y 93.3%) presentaron datos menores a los 55 y 23 individuos respectivamente. Por último, en las CL (7-36 individuos) y en la RP (18-37) se observan rangos similares en abundancia arbórea con poca presencia de reforestación (Fig. 51b).

En la talla arbórea máxima, los árboles más altos se ubicaron en la RP (9-32 m) y los LB (12-30 m). Las geoformas de CLSN (9.5-26 m), CL (17-24 m) y MV (16-26 m) presentan rangos similares. En tanto que en las geoformas de RP (5-19 m), LMC (11-22 m) y LC (9-19 m) destaca su similitud en tallas arbóreas bajas respecto al resto de las geoformas (Fig. 51c).



**Figura 51.** Recurso potencial arbóreo al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

En cuanto al recurso potencial arbóreo destacan las geoformas de RPI, MV, LB y LMC por tener altos valores en riqueza de especies maderables, abundancia arbórea y talla arbórea máxima. Estas geoformas son las más expuestas al cambio de uso de suelo por actividades forestales extractivas y en algunos casos ilegales, lo cual puede resultar en una mayor incidencia de procesos gravitacionales al tener depósitos expuestos a la erosión.

Si bien la geoforma de CLSN también posee valores altos en abundancia y talla máxima arbórea, esta no está tan expuesta a la extracción de madera debido a que aún se encuentra protegida por estar dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba. En el resto de las geoformas (CL, RP y LC), se observan datos bajos de riqueza y abundancia que podrían indicar una baja exposición a actividades

forestales extractivas, extensivas e ilegales, sin embargo, son zonas donde si hay presencia de deforestación.

- *Aprovechamiento forestal.*

El aprovechamiento forestal sugiere llevar a cabo prácticas sustentables para la extracción de madera, las cuales tengan una planeación adecuada que minimice los impactos que está pudiera tener en los bosques (CONAFOR, 2015). En la subcuenca se observaron cómo indicadores de la extracción de madera principalmente árboles ocoteados, árboles quemados, árboles ramoneados y presencia de tocones de árboles. En la mayoría de los indicadores se encontraron valores atípicos y extremos en algunas geoformas, estos valores responden a que el aprovechamiento forestal es más frecuente solo en algunos sitios.

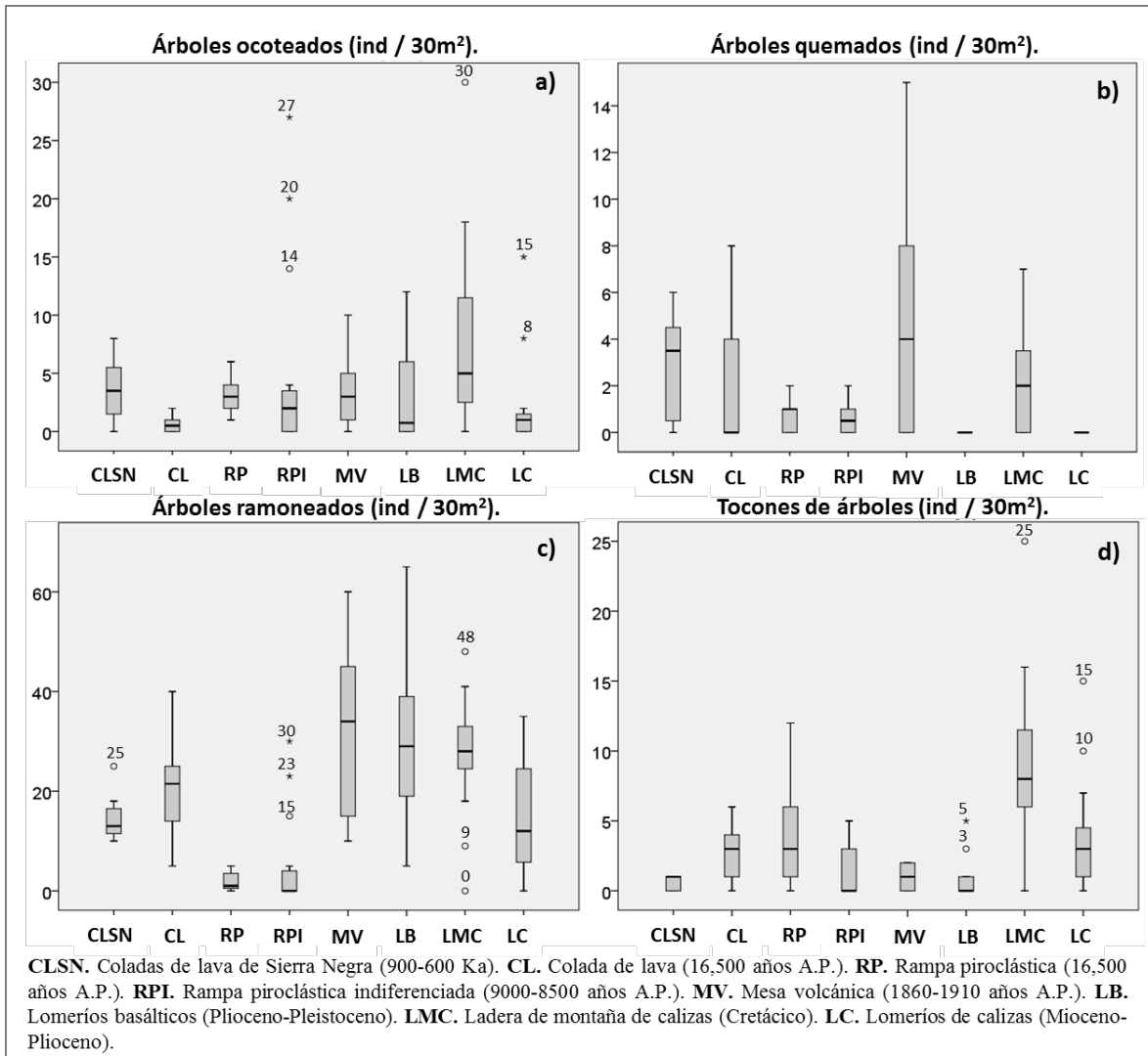
La mayor cantidad de árboles ocoteados por cuadrante se encontraron en la geoforma de LC (0-30 individuos), seguida por la RPI (0-27 individuos) y los LC (0-15 individuos). Las geoformas de CLSN (0-8 individuos), MV (0-10 individuos) y LB (0-12 individuos) poseen rangos similares. En tanto que las geoformas que destacan por valores bajos son RP (0-6 individuos) y CL (0-2 individuos), siendo esta última la que menos árboles ocoteados presento. Cabe mencionar que al interior de las geoformas hubo cuadrantes sin árboles ocoteados, las geoformas con más cuadrantes limpios de ocoteo fueron las de CLSN (50%), LB (50%) y LC (46.6%) (Fig. 52a).

Las geoformas con mayor cantidad de árboles quemados fueron las de MV (0-15 individuos), CL (0-8 individuos), LMC (0-7 individuos) y CLSN (0-6 individuos). Las geoformas RP y RPI obtuvieron el mismo número de árboles quemado por cuadrante (0-2 individuos). Las geoformas con más cuadrantes limpios de árboles quemados fueron LB (100%), LC (100%), CL (70%) y RPI (50%) (Fig. 52b).

En el caso de árboles ramoneados los valores más altos se ubican en las geoformas de LB (5-65 individuos), MV (10-60 individuos) y LMC (0-48 individuos). Las geoformas de CL (5-40 individuos), LC (0-35 individuos) y RPI (0-30 individuos) presentan rangos similares. A están geoformas le siguen CLSN (10-25 individuos) y RP (0-5 individuos), siendo esta última la que menos árboles ramoneados registro. Las geoforma con más cuadrantes libres de árboles ramoneados fue la RPI (62.5%), en el resto de las geoformas presentan menos del 27.2% (RP) de sus cuadrantes sin árboles ramoneados (Fig. 52c).

Por último, las geoformas con más presencia de tocones (árboles cortados) son LMC (0-25 individuos), LC (0-15 individuos) y RP (0-12 individuos). Las geoformas de CL (0-5 individuos), RPI (0-5 individuos) y LB (0-5 individuos). Las geoformas con menos incidencia de tocones son

MV (0-2 individuos) y CLSN (0-1 individuos). Las geoformas con más cuadrantes libres de tala de árboles son RPI (62.5%) y LB (58.3%) (Fig. 52d).



**Figura 52.** Aprovechamiento arbóreo al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

Las prácticas de extracción maderera no son las mismas para todas las geoformas ni tampoco tienen la misma intensidad al interior de ellas, sin embargo, la alteración que ocurre en los sitios en donde se aprovechan los árboles, también genera una perturbación en sitios aledaños que se utilizan para fraccionar, limpiar y acumular los fustes y ramas derivadas de la extracción, situación que se repite en sitios donde los árboles han sido ocoteados o quemados para su posterior aprovechamiento. Así, la perturbación derivada de esta actividad extractiva representa una pérdida de biomasa no solo de



los árboles y sus derivados sino del resto del resto de los componentes ecosistémicos que integran el bosque y que con estas actividades resultan dañados a corto, mediano y largo plazo.

- *Intervención forestal.*

En este trabajo se consideró a la intervención forestal como una práctica que modifican a los bosques de forma indirecta, para su evaluación se tomó como indicadores la presencia de campos agrícolas adyacentes a los fragmentos de bosque, actividades pecuarias al interior de los fragmentos, cobertura de hojarasca y reforestación en los cuadrantes.

Al interior de la subcuenca las actividades agrícolas están restringidas para las geoformas CLSN, CL y RP, lo anterior debido a que se encuentran dentro del polígono considerado como Parque Nacional Pico de Orizaba; en el resto de las geoformas se pueden encontrar áreas agrícolas adyacentes a los fragmentos de bosque. La geoforma con más actividades agrícolas adyacentes a sus cuadrantes muestreados es la de MV (100%), le siguen LB (91.6%), RPI (87.5%), LC (86.6%) y LMC (80%) (Fig. 53a).

En las actividades pecuarias también se observó su ausencia en los cuadrantes muestreado de las geoformas CLSN, CL y RP, no obstante, en el resto de las geoformas si se registró su presencia. La geoforma que tuvo todos sus cuadrantes muestreados con actividades pecuarias son RPI (100%), le continúan las geoformas LC (86.6%), MV (77.7%), LB (50%) y LMC (46.6%) (Fig. 53b).

La cobertura de hojarasca se evaluó relacionando su presencia con los sitios menos alterados debido a la presencia de actividades humanas y pecuarias, siendo así, la geoforma que presenta cuadrantes con menor alteración es la CL (75-100%), también destacan las geoformas CLSN (70-100%), MV (70-100%), LB (68-100%) y LMC (51-95%) que poseen valores altos en sus coberturas de hojarasca. Las geoformas de LC (15-100%) y RPI (5-100%) también poseen valores altos, pero también tuvieron cuadrantes con baja cobertura de hojarasca. Por último, la geoforma de RP (10-65%) fue la que registro más valores bajos de cubierta de hojarasca en sus cuadrantes (Fig. 53c).

Finalmente, la reforestación al interior de la subcuenca tiene una presencia en todos los cuadrantes de las geoformas CLSN (100%), CL (100%) y RP (100%). En el resto de las geoformas se observaron reforestaciones pero en menor número, siguiendo el orden de LB (66.6%), LMC (53.3%), MV (44.4%), RPI (37.5) y LC (13.3%), siendo esta última en la que menos árboles han sido reforestados (Fig. 53d).

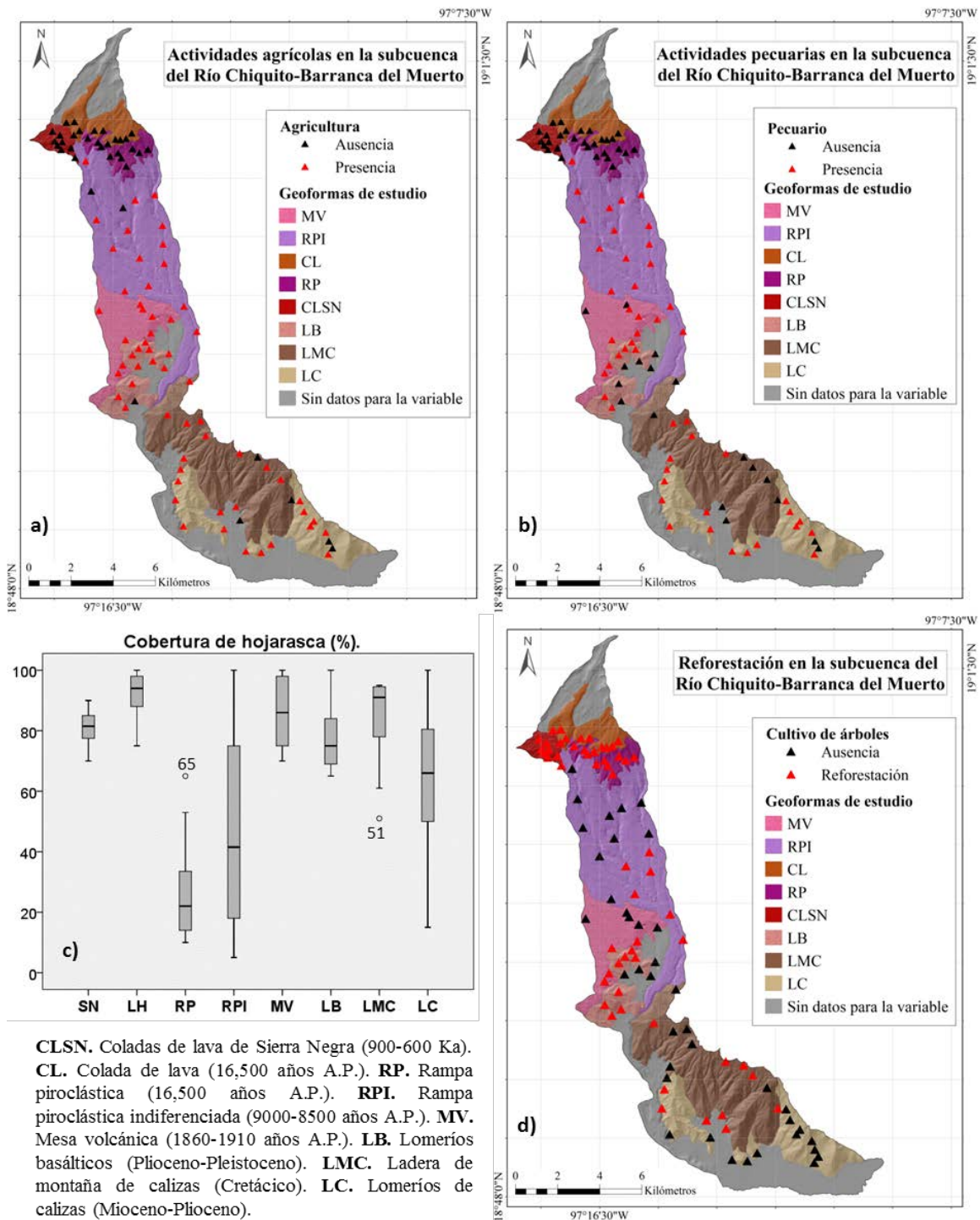


Figura 53. Intervención forestal al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

Las geoformas que se encuentran al interior del polígono del Parque Nacional Pico de Orizaba, no presentan intervención forestal agrícola o pecuaria, sin embargo si hay una alteración en la cobertura de hojarasca, la cual puede responder a la intervención por el manejo forestal que tienen estas geoformas en su calidad de área protegida (reforestación y aprovechamiento forestal). Aunque en el caso de la geoforma de RP los valores bajos en la cobertura de hojarasca de la mayoría de sus cuadrantes, pueden estar relacionados con la considerable presencia de tocones (1-12 tocones en el 81.8% de sus cuadrantes), producto de la tala de árboles.

En el resto de los cuadrantes de la subcuenca, la intervención de actividades agrícolas (mayor al 80%) y forestales (mayor a 46.6%) es considerable, a pesar de que solo la RPI y los LC tienen cuadrantes con valores bajos en su cobertura de hojarasca (datos que coinciden con los valores altos de árboles ocoteados y ramoneados). Lo anterior indica que en las geoformas que no forman parte del Parque Nacional Pico de Orizaba hay una perturbación que puede derivar en cambio de uso de suelo a mediano o largo plazo.

En cuanto a la reforestación, nuevamente las geoformas que se ubican dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba son las que más se benefician al tener árboles reforestados en todos los cuadrantes muestreados. En otras geoformas se observan reforestaciones, pero en menor intensidad, la más favorecida son los lomeríos basálticos dado que la pérdida de horizontes edáficos superficiales que presenta se puede llegar a contener con esta práctica. En la LMC la reforestación es mayor al 53.3%, pero lo que más llama la atención es un cuadrante con reforestación de encinos que se encuentra junto a un horno de carbón, lo cual sugiere una incursión en un aprovechamiento forestal sustentable.

Si bien son notables las prácticas forestales que pretenden restaurar los bosques de la subcuenca, es necesario mencionar que los programas gubernamentales otorgan los árboles (*juniperus sp.* y *pinus patula*) sin una capacitación para plantarlos. Esto se pone de manifiesto en reforestaciones de más de 30 años que en un inicio protegían de los procesos erosivos y gravitacionales a las laderas, pero que en la actualidad representan un sobrepeso, ya que las laderas que no logran equilibrar el peso de los árboles más el peso de los suelos mojados después del periodo de lluvias y se convierten en un factor más de inestabilidad de laderas. Además de que las reforestaciones con especies alóctonas rompen con el equilibrio interespecífico al interior de los fragmentos de bosque, ocasionando una pérdida de biodiversidad y por tanto de nichos ecológicos.

- **Variables asociadas a la inestabilidad de laderas.**

Para determinar como la estructura del terreno incide en la formación de procesos gravitacionales se eligieron 11 variables asociadas al relieve y a la estructura de los suelos, mismas que se analizaron por geoforma de la siguiente manera:

Relieve.

En este rubro se considera que las laderas con mayor pendiente, las que tienen orientación norte, las modeladas por procesos hídricos, las que están más cerca a procesos gravitacionales y las que están más expuestas a los procesos hidrometeorológicos por falta de un dosel que minimice los impactos erosivos; serán las que presenten una mayor incidencia de procesos gravitacionales en un futuro.

En el caso de la pendiente al interior de la subcuenca, se observa que la mayoría de las geoformas tienen una propensión a procesos gravitacionales, a excepción de la MV y algunas áreas de RPI y la CL (Fig.54a).

La orientación de ladera de la subcuenca tiene una orientación sur, que en términos generales facilitaría la evaporación del agua después de la temporada de lluvias, no obstante, existen algunos sitios con orientación norte que al permanecer húmedos después de la temporada de lluvias pueden desencadenar procesos gravitacionales. Siendo así, el orden de las geoformas de mayor a menor área con laderas que se orientan al norte son la RPI con 5.35 km<sup>2</sup> (20.8% del área total de la geoforma), LMC con 3.92 km<sup>2</sup> (20.12% del área total de la geoforma), LC con 2.64 km<sup>2</sup> (23.7% del área total de la geoforma), MV con 1.52 km<sup>2</sup> (18.9% del área total de la geoforma), LB con 1.2 km<sup>2</sup> (24.5% del área total de la geoforma), CL con 0.87 km<sup>2</sup> (18.8% del área total de la geoforma), RP con 0.67 km<sup>2</sup> (20.7% del área total de la geoforma) y CLSN con 0.47 km<sup>2</sup> (26.7% del área total de la geoforma) (Fig. 54b).

La red hídrica al interior de la subcuenca es más funcional durante la temporada de lluvias, ya que en esta área no hay ríos permanentes, sin embargo, en las geoformas de CLSN, CL y algunos sitios de la RP se presentan riachuelos producto del deshielo en las partes altas del Volcán Pico de Orizaba. En tanto que en la LMC se observa una mayor densidad y profundidad de disección (Fig. 54c).

En cuanto a la cercanía a procesos gravitacionales, en este estudio se considera que son 100 m la distancia máxima que puede llegar a inferir un proceso gravitacional en otro, lo anterior debido a que esa es longitud promedio de los procesos gravitacionales aquí analizados, además se añade a la pendiente para ponderar que la propensión a generar nuevos procesos gravitacionales aumenta en áreas de mayor inclinación. Con base en lo anterior, se consideraron las distancias a procesos

gravitacionales con alta pendiente y se determinaron tres áreas de propensión a nuevos procesos gravitacionales: alta (10 – 40 m), media (40 – 70 m) y baja (70 – 100 m), el orden de las geoformas que tienen más área con alta propensión a procesos gravitacionales generados a partir de otro son: RPI con 2.63 km<sup>2</sup>, LC con 0.94 km<sup>2</sup>, LMC con 0.75 km<sup>2</sup>, RP con 0.19 km<sup>2</sup>, CL con 0.12 km<sup>2</sup>, MV con 0.1 km<sup>2</sup>, LB con 0.07 km<sup>2</sup> y CLSN con 0.02 km<sup>2</sup> (Fig. 54d).

Finalmente, el dosel de los árboles interfiere con el impacto de las gotas de lluvias y por ende con la erosión derivada de ella, así la densidad de árboles sumada la posible formación de nuevos procesos gravitacionales en una distancia de 100m (mapa de cercanía a procesos gravitacionales), permite conocer que sitios están menos expuestos a procesos erosivos durante la temporada de lluvias. Dado lo anterior, se toman las áreas que otorgan más del 40% de protección por el dosel arbóreo y se ordenó a las geoformas de mayor a menor de acuerdo al porcentaje de terreno que podría estar protegido ante nuevos procesos gravitacionales, siendo así, las geoformas se ordenan en MV con 71.42% (0.15 km<sup>2</sup> del área con procesos gravitacionales), LB con 70.96% (0.22 km<sup>2</sup> del área con procesos gravitacionales), RP con 64.52% (0.40 km<sup>2</sup> del área con procesos gravitacionales), CLSN con 57.14% (0.04 km<sup>2</sup> del área con procesos gravitacionales), RPI con 57.9% (2.86 km<sup>2</sup> del área con procesos gravitacionales), LMC con 56.66% (1.02 km<sup>2</sup> del área con procesos gravitacionales), CL con 53.12% (0.17 km<sup>2</sup> del área con procesos gravitacionales) y LC con 51.18% (0.87 km<sup>2</sup> del área con procesos gravitacionales) (Fig. 54e).

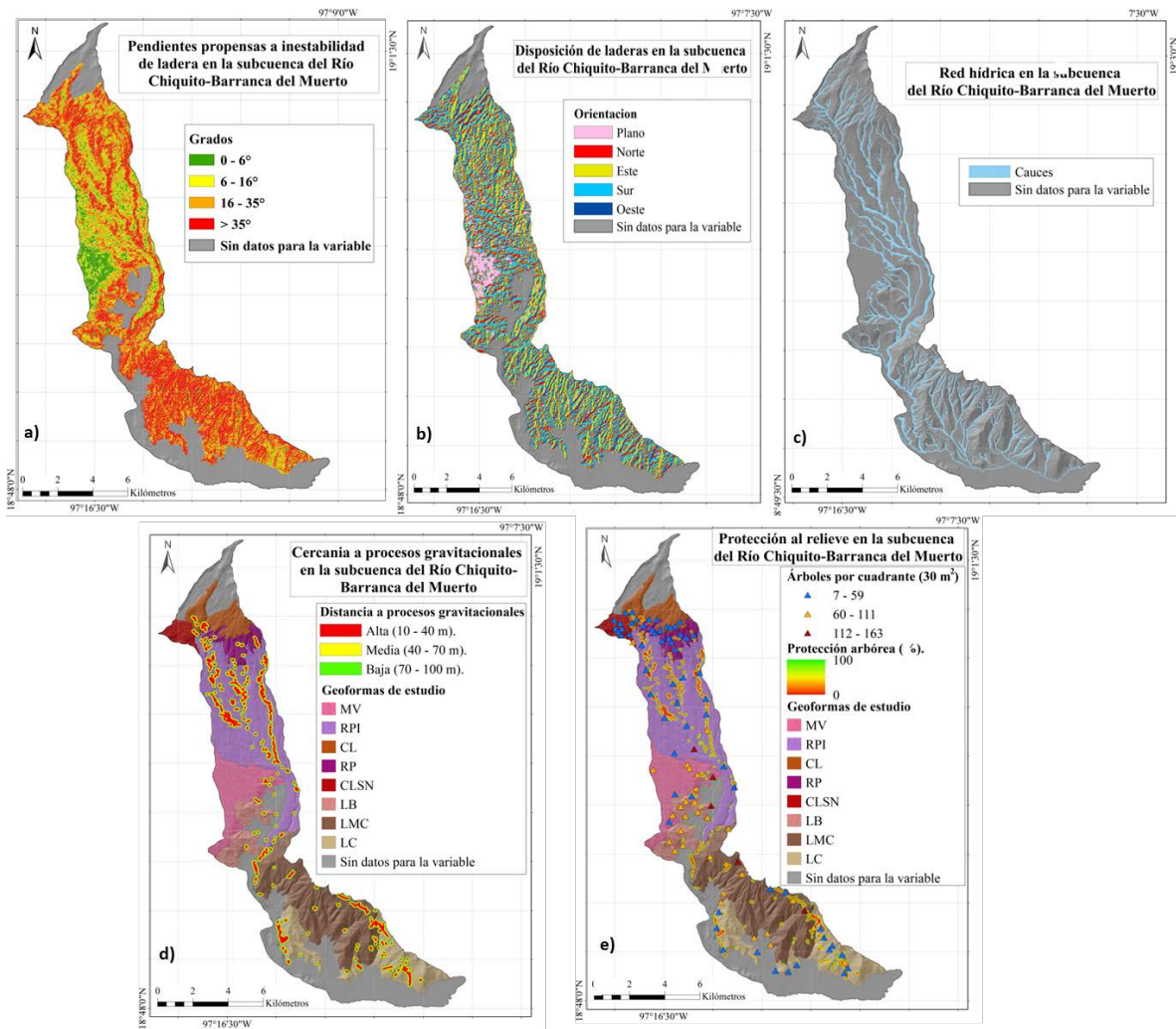


Figura 54. Relieve al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

De acuerdo con el relieve, la geoforma que está más expuesta a procesos gravitacionales es la RPI al tener más área con exposición norte (5.35 km<sup>2</sup>) y por ende con mayor acumulación de agua posterior a la temporada de lluvia; además de los 0.39 km<sup>2</sup> de procesos gravitacionales que ha presentado esta geoforma entre 1994 y 2012 se suman los 2.63 km<sup>2</sup> que están propensos a desarrollar inestabilidad de laderas por su cercanía a otros procesos gravitacionales; no obstante, el dosel de los árboles podría limitar el impacto de las gotas de lluvia en estas áreas contrarrestando la formación de nuevos procesos gravitacionales en hasta un 64.52%.

Igualmente, los LC también tienen una exposición considerable ya que presentan 2.64 km<sup>2</sup> con exposición norte, 0.94 km<sup>2</sup> propensos a nuevos procesos gravitacionales que se suman a los 0.91 km<sup>2</sup> ya desplazados entre 1994 y 2012, sin embargo, esta propensión podría reducirse gracias a la protección del dosel arbóreo (51.18%).

A esta geoforma le sigue la LMC con 3.92 km<sup>2</sup> de orientación norte, 0.75 km<sup>2</sup> proclives a formar nuevos procesos gravitacionales adicionales a los 0.1 km<sup>2</sup> ya removidos entre 1994 y 2012; pero con una protección arbórea que podría ayudar a la estabilización de hasta el 56.66% del terreno.

En el caso de CLSN, a partir de datos del relieve se puede considerar como la geoforma con menor inestabilidad de ladera ya que solo cuenta con 0.47 km<sup>2</sup> orientados al norte, 0.02 km<sup>2</sup> propensos a nuevos procesos gravitacionales que se suman a los 3,379 m<sup>2</sup> que fueron desestabilizados entre 1994 y 2012, y una protección arbórea de hasta el 57.14%; lo anterior a pesar de las fuertes pendientes (3 a 65°) y al aporte de agua de riachuelos derivados del deshielo en la cima del Volcán.

#### Estructura de suelo.

El suelo al ser el depósito más expuesto de una ladera, puede contribuir a la contención o aceleración de los procesos gravitacionales, principalmente en la forma en la que distribuye el agua después de la época de lluvias; es por ello que se consideraron las variables de conductividad hidráulica, densidad aparente, erosionabilidad, estabilidad de agregados, profundidad de raíces y textura del suelo como indicadores del balance hídrico de los suelos al interior de la subcuenca.

En la conductividad hidráulica, los suelos de la CL obtuvieron una evaluación de 5 que equivale a extremadamente alta (mayor a 300 cm/día) y fueron los únicos que se mostraron homogéneos en todos los cuadrantes muestreados. Con valores de altos a extremadamente altos (4-5 de evaluación) en la mayoría de sus cuadrantes están las CLSN (mayor a 100 cm/día). Las geoformas RPI, LB y LC presentan rangos de media a extremadamente alta (3-5 de evaluación) conductividad hidráulica (10 a 300 cm/día), mientras que en la RP, MV y LMC se observan los rangos de media a alta conductividad hidráulica (3-4 de evaluación) hidráulica de la subcuenca (10-100 cm/día) (Fig. 55a). La densidad aparente es similar en la mayoría de las geoformas de la subcuenca (CL, RP, RPI, MV, LB y LMC) con un rango de 1-1.2 g/cm<sup>3</sup> para cada una de ellas. Los LC poseen cuadrantes con suelos más compactos (1-1.4 g/cm<sup>3</sup>), en tanto que en CLSN se registraron los suelos más suaves (1 g/cm<sup>3</sup>) (Fig. 55b).

El factor de erosionabilidad más alto se observó en la geoforma RP (0.24-0.32 K). Las geoformas LB (0.1-0.26 K), LC (0.11-0.2 K), LMC (0.1-0.2 K) y MV (0.11-0.19 K) tienen rangos de erosionabilidad similares, mientras que las geoformas de CLSN (0.08-0.15 K), RPI (0.06-0.11 K) y CL (0.06-0.1 K) mostraron los valores más bajos de erosionabilidad (Fig. 55c).

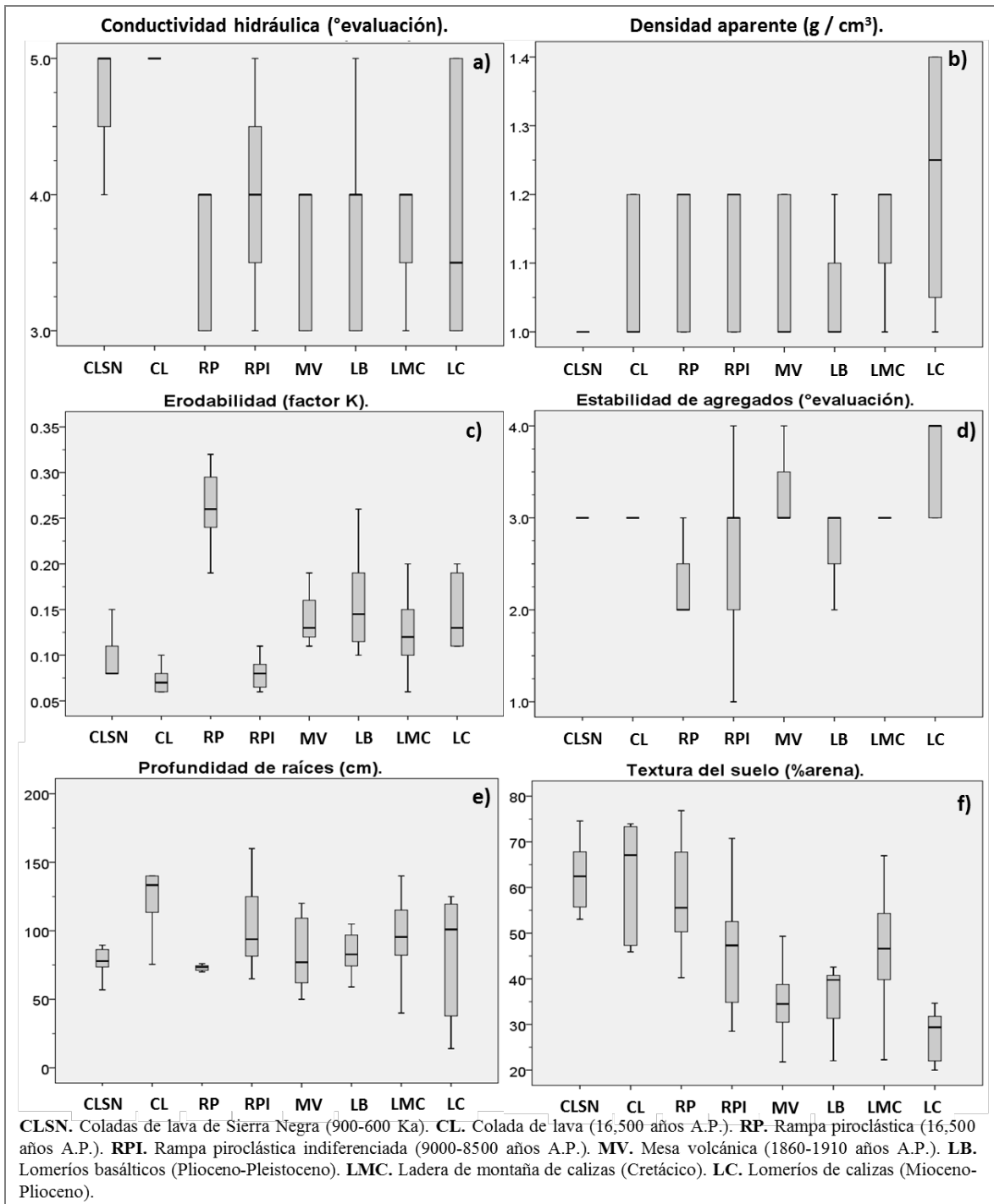
La estabilidad de agregados va de muy baja a muy alta (1-5 niveles de evaluación), siendo así las geoformas que presentaron cuadrantes con mayor estabilidad de agregados son LC (mediana a alta), MV (mediana a alta), y RPI (baja a alta). Por otro lado, las geoformas de LB y RP tuvieron una

evaluación similar (baja a mediana); y en las geoformas CLSN, CL y LMC fue la misma en todos sus cuadrantes muestreados (mediana) (Fig. 55d).

En profundidad de raíces la geoforma con cuadrantes que poseen raíces más profundas fue la de RPI (75-160 cm), le siguen la CL (75.5-140 cm), LMC (40-140 cm), MV (50-140 cm) y LB (60-105 cm). Las geoformas de CLSN (57-87 cm) y RP (70-76 cm) tienen cuadrantes con poca variabilidad en sus rangos, mientras que en los LC (14-125 cm) se ubicaron algunos sitios con muy baja profundidad de raíces (Fig. 55e).

Finalmente, la textura edáfica evaluada con el porcentaje de arena presente en los suelos muestra que las geoformas de RP (40.3-76.8%), CLSN (53-74.5%) y CL (46-73.3%) son las que más porcentaje de arena tienen. La RPI (29.2-70.8%) y la LMC (22.3-67%) también tienen altos valores en porcentaje de arena, pero la variabilidad en sus datos es mayor respecto al resto de las geoformas. Por último, las geoformas de MV (22-49.3%), LB (22-42.6%) y LC (20-34.6%) presentan los suelos con menor porcentaje de arena (Fig. 55f).





**Figura 55.** Estructura del suelo al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

En el balance hídrico se observa que los suelos al interior de la subcuenca tienen una conductividad hidráulica de media a muy alta, lo que indica que los suelos pueden transportar agua y aire en su

interior con limitadas restricciones. La densidad aparente va de baja a mediana por lo que la compactación de los suelos no es de consideración en la mayoría de los cuadrantes muestreados. La erosionabilidad en toda la subcuenca va de muy baja a media lo que sugiere que sin influencia antrópica, los suelos no son propensos a la erosión. En la estabilidad de agregados hay cuadrantes que son deleznable, sin embargo, en la mayoría de los cuadrantes se observó una estabilidad de baja a alta. La profundidad de raíces en algunos cuadrantes alcanza hasta los 160 cm, pero en otros no rebasa los 14 cm, pero el rango más común va de 50-125 cm, lo que indica que hay raíces que además de retener el suelo también pudieran estar fracturando los agregados más profundos o incluso parte de los depósitos geológicos en los suelos menos desarrollados. Finalmente, se observa un declive en porcentaje de arenas de acuerdo al origen geológico de las geoformas, el cual sigue un gradiente que va de depósitos piroclásticos con altos porcentajes de arena a rocas calizas donde los suelos al tener menos arenas se tornan más arcillosos.

En el análisis por geoformas, destaca la RP con algunos cuadrantes con erosionabilidad media, lo cual coincide con los datos altos en tala de árboles, esto podría indicar que la alta erosionabilidad es producto de la perturbación por agentes antrópicos que aunados a los altos porcentajes de arena y baja estabilidad de agregados facilitan la pérdida del suelo; si bien no es una geoforma con alta incidencia de procesos gravitacionales, si debe considerarse la pérdida de suelo en una área protegida.

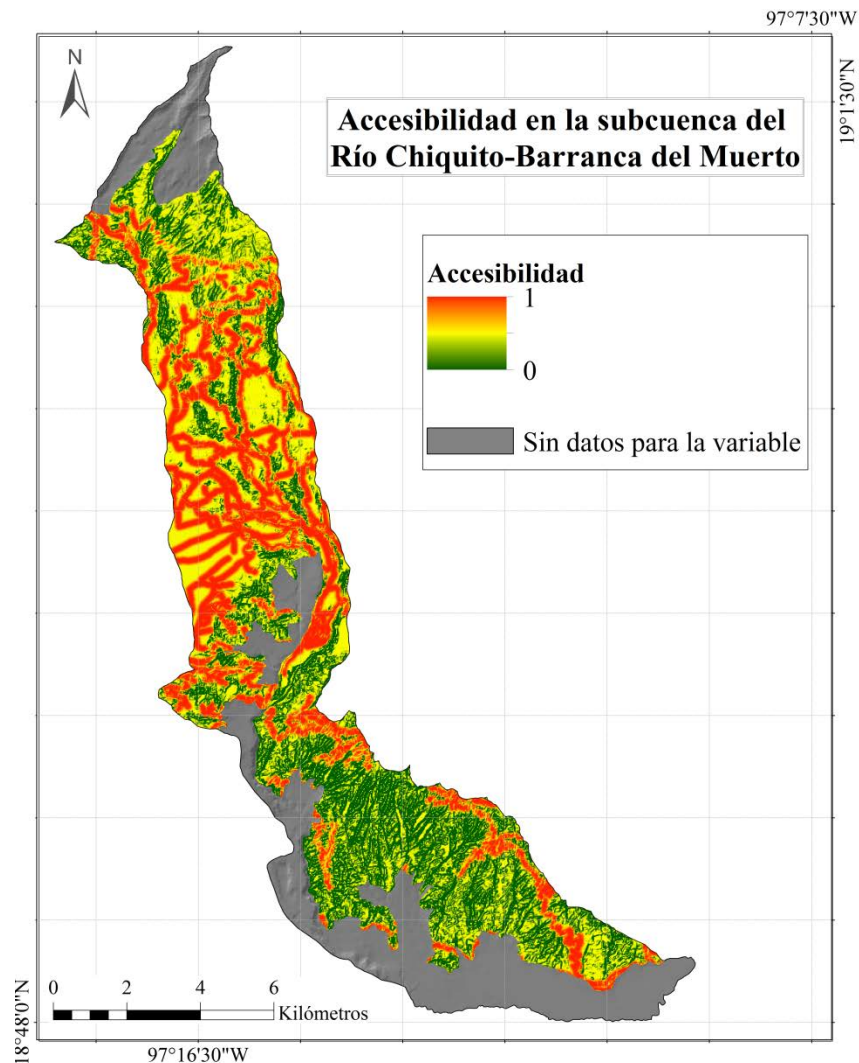
En el caso de la RPI, las variables que destacan son la estabilidad de agregados con algunos cuadrantes muy deleznable, la profundidad de raíces que en algunos sitios pudiera estar contribuyendo a la fracturación de los depósitos geológicos y los porcentajes de arena que en algunas zonas también favorecen la inconsistencia de los suelos; estos datos sumados a las actividades antrópicas y en algunos casos las fuertes pendientes contribuyen a la alta incidencia de procesos gravitacionales que se registran para esta geoforma (257 entre 1994-2012).

ii) **Determinación de áreas asociadas a uso de suelo actual y áreas asociadas a inestabilidad de ladera**

A continuación, se muestran los resultados de la sobreposición difusa siguiendo el modelo teórico propuesto en este estudio, cabe mencionar que este proceso arrojó mapas que poseen una escala de 0 a 1, donde 0 es sin propensión y 1 muy propenso:

- **Áreas asociadas al uso de suelo.**

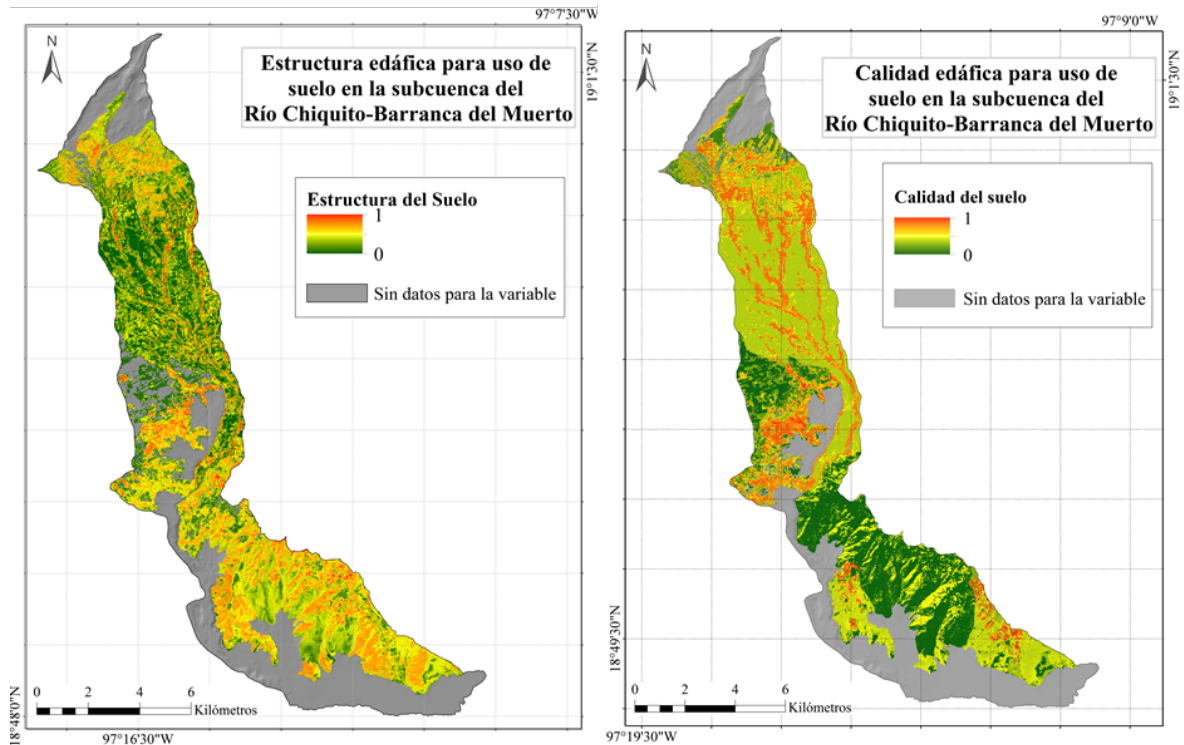
**Accesibilidad:** En este mapa de sobreposición difusa se muestra que a excepción de la CL y la región oeste y sur de la ladera de montaña de roca caliza, en el resto las geoformas existen áreas asociadas a cambio de uso de suelo, esto en función de la accesibilidad para ingresar a ellas y por presentar pendientes favorables para el establecimiento de cultivos agrícolas (Fig. 56).



**Figura 56.** Accesibilidad al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

**Fertilidad del suelo:** En cuanto a la estructura del suelo que conjuga a las variables capacidad de agua disponible, capacidad de aireación, capacidad de campo y volumen total de poros, se observa que el mapa de sobreposición difusa muestra que las geoformas CL, RPI, LB y LMC, presentan áreas favorables para el establecimiento de cultivos agrícolas. En el caso de la calidad del suelo que

incluye bases intercambiables, fósforo en materia orgánica, nitrógeno disponible y concentración de humus, en el mapa destacan algunas áreas de las geoformas CL, RPI, LB y LC (Fig. 57).



**Figura 57.** Fertilidad del suelo al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

**Prácticas forestales:** En el mapa de recurso potencial arbóreo se observa que las geoformas con más riqueza, abundancia y talla máxima arbórea son CLSN, RP, LB y LMC. El mayor aprovechamiento arbóreo con actividades de ocoteo, quema, ramoneo y tala de árboles, se muestra en áreas de las geoformas CLSN, al sur de la RPI, al este de los LB y al sureste de la LMC. En el caso de la intervención forestal que conjuga a las actividades agrícolas-pecuarias, cobertura de hojarasca y reforestación; el mapa de sobreposición difusa indica que prácticamente toda la vegetación natural de la subcuenca está intervenida, quedan exentas la geoforma de MV, las regiones norte de la CL y RP, así como la zona sur de los LC (Fig. 58).

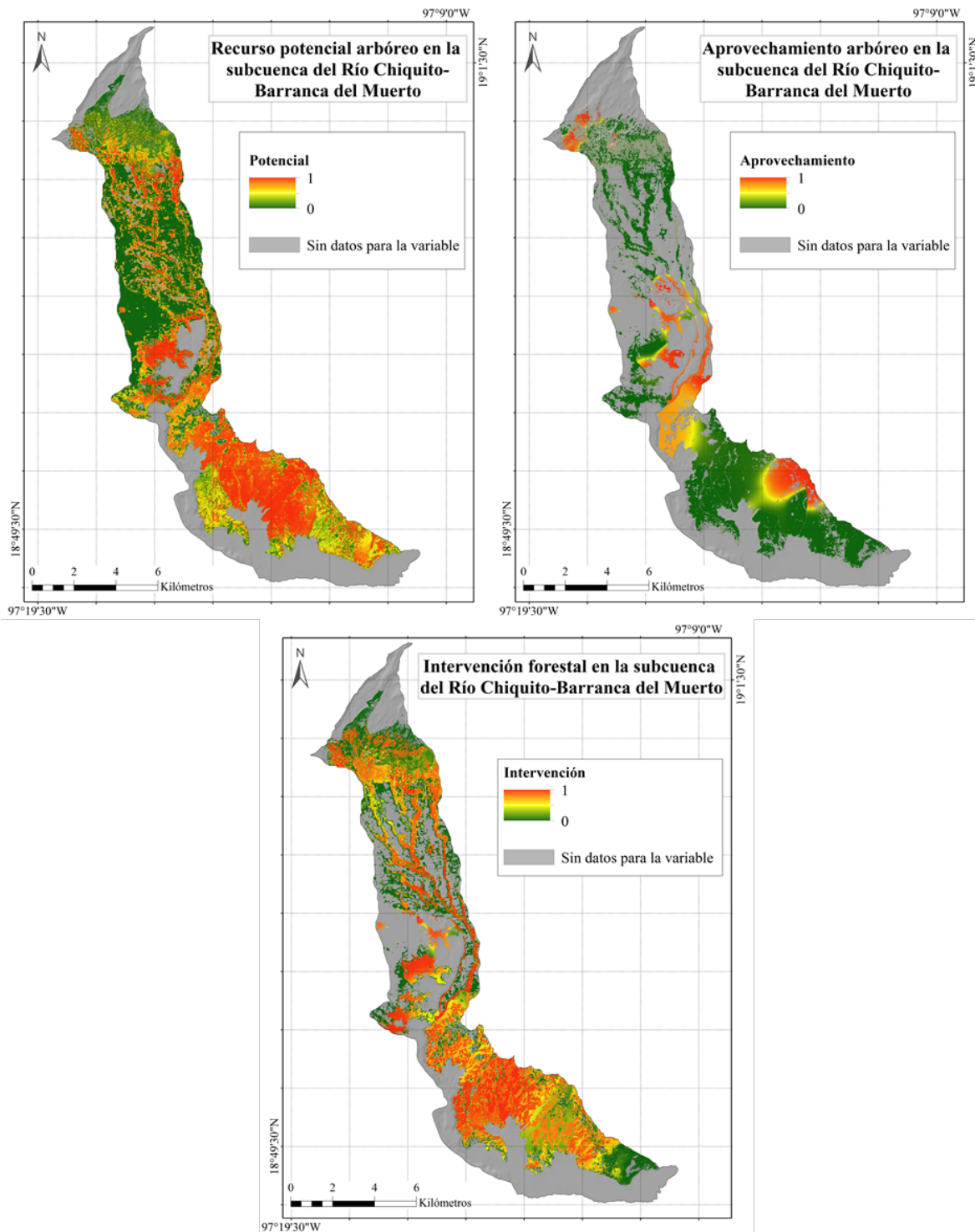
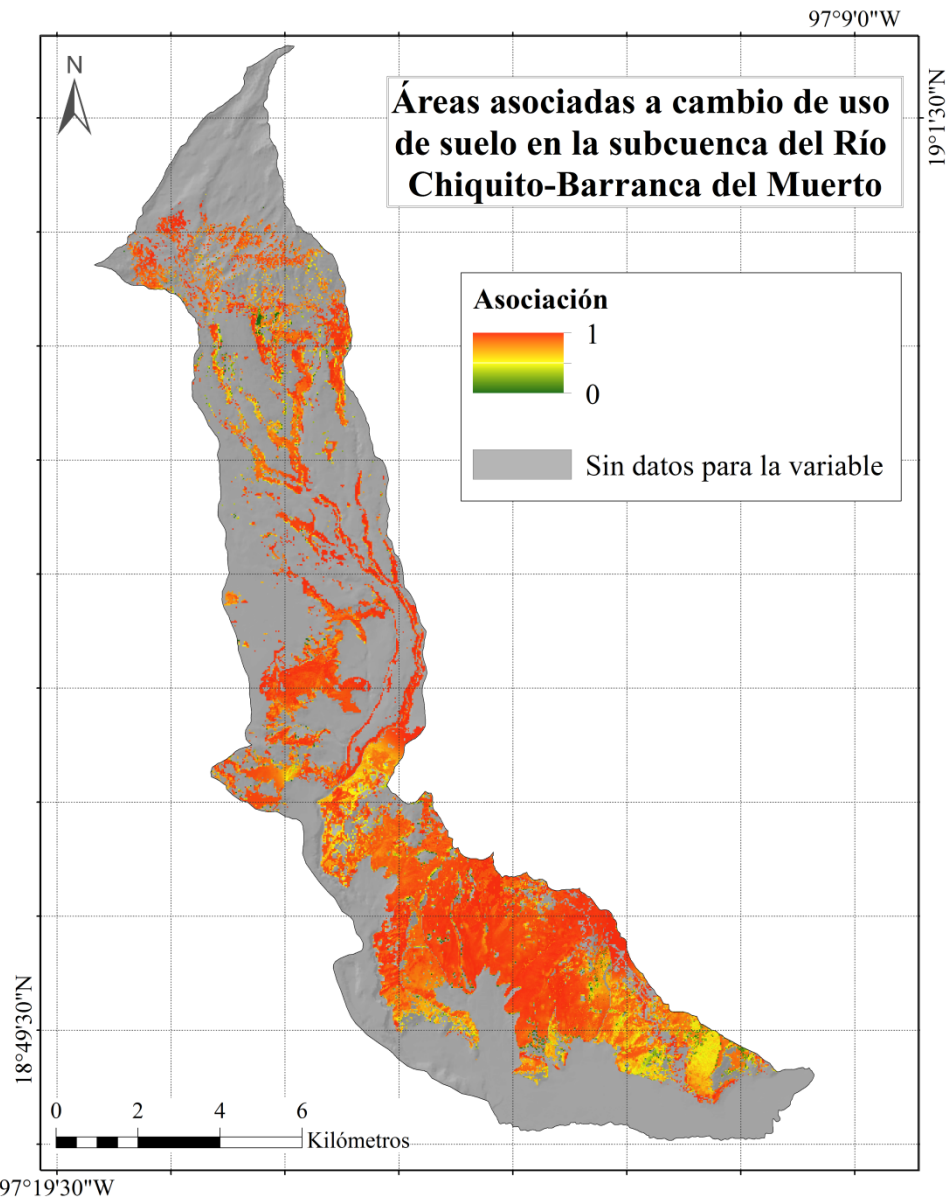


Figura 58. Prácticas forestales al interior de la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

**Áreas asociadas a cambio de uso de suelo actual:** Este mapa es el resultado de la sobreposición difusa de 21 variables relacionadas la accesibilidad, fertilidad del suelo y prácticas forestales al

interior de la subcuenca, dichas variables describen que áreas en el futuro estarán más asociadas a un cambio de uso de suelo, partiendo de las características edáficas y los distintos usos de suelo actuales. Siendo así, en el mapa se observa que solo algunas áreas dentro de las geoformas RPI, LB, LMC y LC presentan una propensión a cambio de uso de suelo de nula a moderada; en el resto de la subcuenca la propensión es alta (Fig. 59).

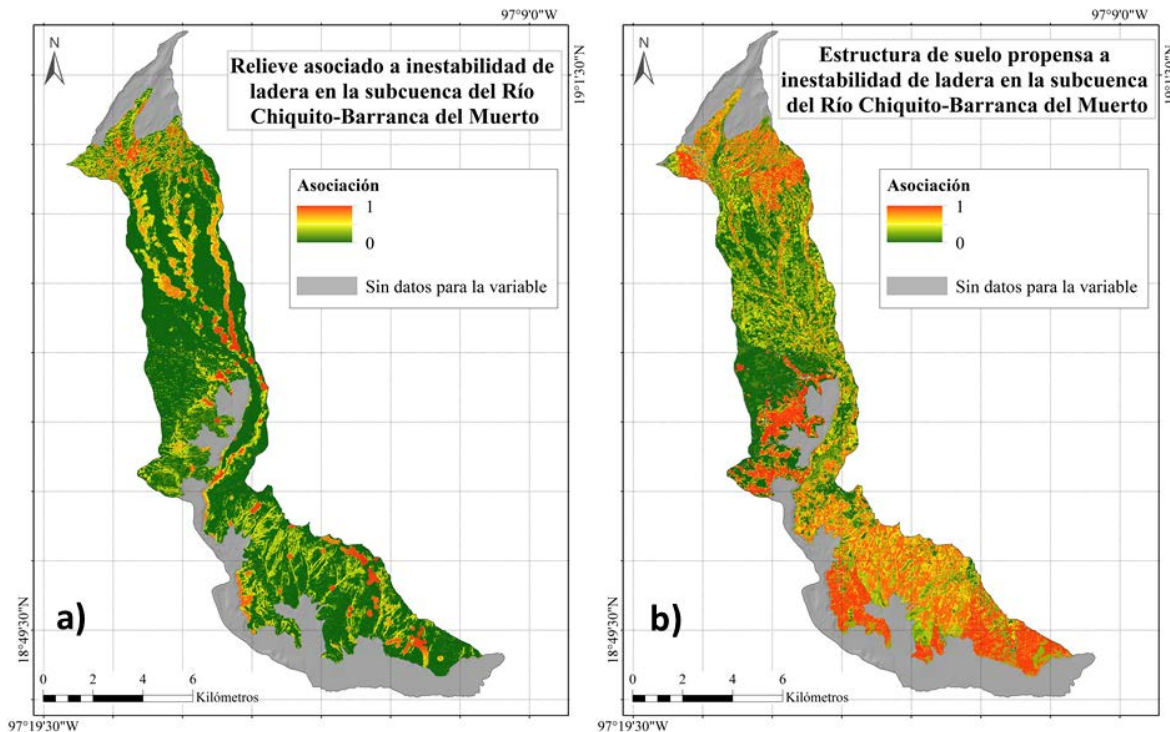


**Figura 59.** Áreas asociadas a cambio de uso en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

- **Variables asociadas a la inestabilidad de laderas.**

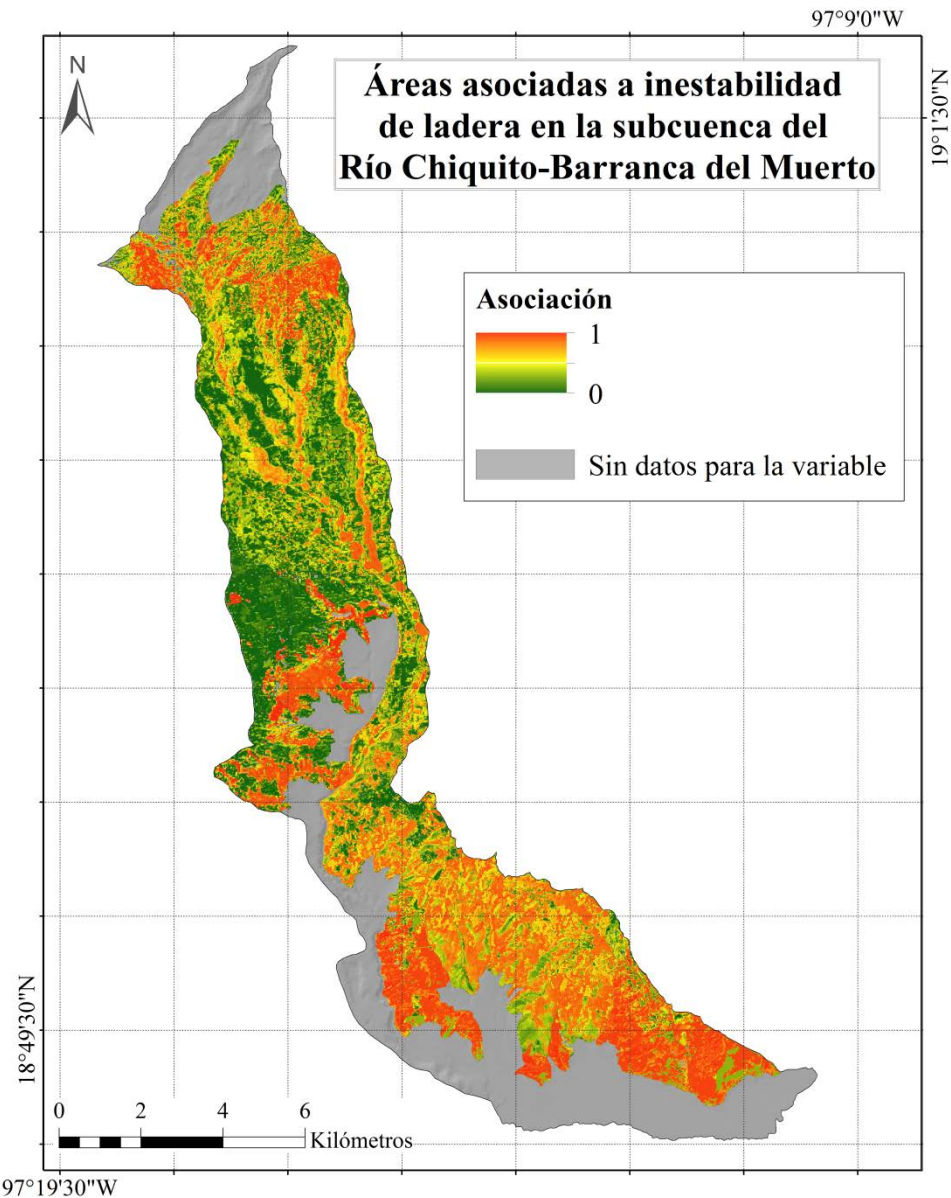
**Relieve:** La sobreposición difusa de las variables distancia a procesos gravitacionales, orientación de ladera, pendiente, protección al relieve y red hídrica indica que existen algunas zonas asociadas a inestabilidad de ladera, estas se ubican en las geoformas CL, RPI, LB, LMC y LC (Fig. 60a).

**Estructura del suelo:** Al sobreponer las variables conductividad hidráulica, densidad aparente, erosionabilidad, estabilidad de agregados, profundidad de raíces y textura, se observa que las geoformas con estructura edáfica más propensa a inestabilidad de laderas son CLSN, CL, LB y LC (Fig. 60b).



**Figura 60.** Variables asociadas a inestabilidad de laderas a) Relieve. b) Estructura de suelo.

**Áreas asociadas a inestabilidad de laderas:** En este mapa se integra por la sobreposición difusa de 11 variables analizadas en la estructura del suelo y el relieve, mismas que representan la estructura edáfica y las condiciones del relieve actuales que podrían derivar en la formación de nuevos procesos gravitacionales. El mapa muestra que en prácticamente todas las geoformas existen áreas asociadas a inestabilidad de laderas. De ellas las que destacan por tener alta propensión son CLSN, CL, RP, RPI, LB y LC (Fig. 61).



**Figura 61.** Áreas asociadas a inestabilidad de laderas en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

***iii) Áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual.***

En este mapa se evalúa la sobreposición difusa de 32 variables asociadas a cambio de uso de suelo e inestabilidad de ladera. Dichas variables parten de las características de relieve, edafología, vegetación arbórea y uso de suelo para encontrar áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual al interior de la subcuenca. En el mapa se puede observar que prácticamente todas las áreas con vegetación natural de las geoformas CL, RPI, LMC y LC están asociadas a inestabilidad de ladera por futuros cambios de uso de suelo (Fig. 62).



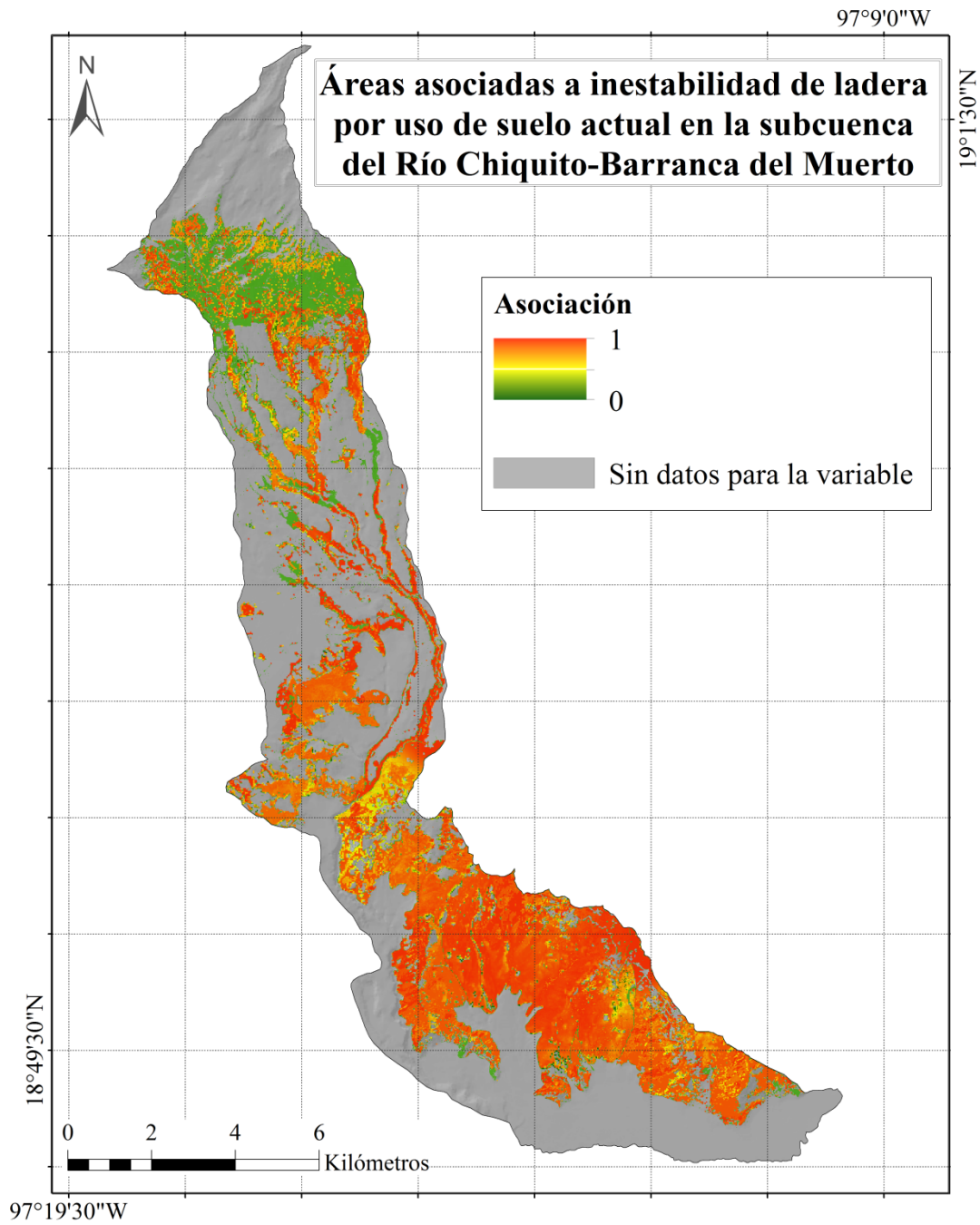


Figura 62. Áreas asociadas a inestabilidad de laderas por uso de suelo actual.

Los resultados de este mapa son el reflejo de lo que en los últimos años ha sucedido en la subcuenca, si bien pareciera que toda la vegetación natural de la zona está condenada a desaparecer y con ello generar más inestabilidad de ladera, es importante recalcar que en los resultados por variable y en cada mapa de superposición difusa, se observa que en cada geofoma influyen

diferentes variables en diferente intensidad. Así, se toma este mapa como punto de partida para observar cual sería la propensión a inestabilidad de laderas por cambio de uso de suelo, pero el análisis para cada geoforma es individual y se destacan las variables de mayor incidencia en cada una de ellas, con la finalidad de poder abarcar la problemática particular y posteriormente sugerir soluciones que coadyuven a evitar la formación de nuevos procesos gravitacionales.

***Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka):*** Es una geoforma con una accesibilidad relativamente reciente, debido a la construcción de un camino para llegar al Telescopio Milimétrico. Sus pendientes son en su mayoría superiores a los  $16^\circ$ . La estructura del suelo tiene una buena capacidad de agua disponible ( $176-485 \text{ L/m}^2$ ) y una buena capacidad de campo ( $210-779 \text{ L/m}^2$ ). En su fertilidad edáfica, destaca por tener sitios con las concentraciones de fósforo más altas en toda la subcuenca ( $109-665 \text{ g/m}^2$ ). En el recurso arbóreo, es notable la talla de los árboles ( $9.5-26 \text{ m}$ ). En la intervención arbórea, se observaron campos agrícolas en límites de la geoforma y presencia de actividades de reforestación en el 100% de los cuadrantes muestreado. Finalmente, en el conjunto de variables referentes a la estructura del suelo propensa a procesos gravitacionales, se observó una conductividad hidráulica alta (mayor a  $100 \text{ cm/día}$ ), la densidad aparente más baja de toda la subcuenca ( $1 \text{ g/cm}^3$ ) y una textura con altos porcentajes de arena ( $53-74.5\%$ ). Es una geoforma con una propensión al cambio de uso de suelo debido a la reciente creación de caminos que facilitan el acceso a suelos ricos en fósforo, con agua disponible y buena retención de la misma; no obstante, el encontrarse dentro del polígono del Parque Nacional Pico de Orizaba restringe el establecimiento de nuevos campos agrícolas en su interior. Sin embargo, si se suma la presencia de campos agrícolas en los límites de la geoforma, la modificación del espacio para construir caminos y los suelos deleznable (baja densidad aparente y altos porcentajes de arena); los efectos para las zonas en contacto con los caminos y campos agrícolas, se traducen en la perturbación para la biota y la formación de nuevos procesos gravitacionales a pesar de la buena conductividad hidráulica de sus suelos.

***Colada de lava (16,500 años A.P.):*** Tiene estructura del suelo con buena capacidad de agua disponible ( $188-379 \text{ L/m}^2$ ), buena capacidad de campo ( $459-643 \text{ L/m}^2$ ) y la mayor capacidad de aireación de toda la subcuenca ( $7.91-14.64\%$ ). En la calidad de suelo presenta buenas concentraciones de fósforo ( $327-541 \text{ g/m}^2$ ). En el aprovechamiento arbóreo destaca por la alta presencia de árboles ramoneados ( $5-40$  individuos) al oeste de la geoforma. La intervención forestal se da en la reforestación ( $75-100\%$ ). Y en estructura del suelo propensa a procesos gravitacionales, se observa una alta conductividad hidráulica (mayor a  $300 \text{ cm/día}$ ), una alta profundidad de raíces

(75.5-140 cm) y una textura del suelo deleznable al presentar entre 46-73.3% de arena. Esta geoforma a pesar de tener suelos aptos para la agricultura con buena capacidad de agua disponible, buena capacidad de aireación y buenas concentraciones de fósforo, y una alta incidencia de ramoneo, no es propensa al cambio de uso de suelo por la falta de caminos y por ser parte del Parque Nacional Pico de Orizaba. Por otro lado, la propensión a procesos gravitacionales solo se limitaría a sitios con alta profundidad de raíces y altas concentraciones de arena, que reaccionarían principalmente al impacto de lluvias atípicas.

***Rampa piroclástica (16,500 años A.P.):*** Presenta poca accesibilidad por terracerías y posee en su mayoría pendientes superiores a los 16°. Tiene una buena capacidad de aireación al sureste (7.11-12.3%). En el aprovechamiento arbóreo se observa una alta presencia de tala (0-12 tocones por cuadrante). Tiene algunos sitios con alta intervención forestal (10-65% de cobertura de hojarasca). La estructura del suelo propensa a procesos gravitacionales muestra una baja conductividad hidráulica (10-100 cm/día), posee la erosionabilidad la más alta de toda la subcuenca (0.24-0.32 K) y una textura con alta concentración de arena (40.3-76.8%). Es una geoforma que, a pesar de encontrarse dentro del polígono del Parque Nacional Pico de Orizaba, tiene una propensión considerable al cambio de uso de suelo debido al aprovechamiento forestal que se refleja en la presencia de tala y los bajos porcentajes de hojarasca, en algunos casos asociados al disturbio que se ocasiona con el corte y transporte de árboles talados. La propensión a inestabilidad de ladera es considerable en algunos sitios, esta se deriva de la baja conductividad hidráulica y suelos deleznales que favorecen la remoción de los depósitos durante la temporada de lluvias y se traducen en la alta erosionabilidad de la geoforma.

***Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.):*** Tiene una alta accesibilidad por terracerías y brechas. Sus pendientes van de 1 a 42°. Tiene una buena estructura de suelo en cuanto a la capacidad de campo (281-593 L/m<sup>2</sup>). Una buena calidad del suelo con concentraciones de fósforo altas (221-626 g/m<sup>2</sup>), concentraciones de nitrógeno disponible medias (6-16 g/m<sup>2</sup>) y altas concentraciones de humus (22-63 kg/m<sup>2</sup>). Posee sitios con los árboles más altos de toda la subcuenca (9-32 m). El aprovechamiento forestal es más intenso al sur de la geoforma mostrando valores altos en ocoteo (0-27 individuos). Tiene una alta intervención forestal con la presencia de agricultura en el 87.5% de los sitios adyacentes a los cuadrantes evaluados, el 100% de los cuadrantes con actividades pecuarias y algunos sitios con muy poca hojarasca (5-100%). El relieve propenso a procesos gravitacionales se ubica al sur de la geoforma y se caracteriza por tener un 20.8% del área total orientada al norte, 2.63 km<sup>2</sup> están cercanos a procesos gravitacionales. En esta

geoforma el cambio de uso de suelo es muy alto, debido a que son suelos muy accesibles, son ricos en nutrimentos y tienen una buena retención del agua, situación que los hace atractivos para actividades agrícolas y pecuarias. La vegetación natural solo se observa al interior de los cauces y tiene una alta perturbación debida a la presencia de ocoteo, actividades agrícolas y actividades pecuarias; lo cual se refleja en sitios con poca hojarasca. Por otro lado, la propensión a inestabilidad de ladera es debida a la conjunción de fuertes pendientes, la remoción de vegetación en áreas colindantes a cauces para establecer áreas agrícolas, la constante intervención forestal-pecuaria y la alta incidencia de procesos gravitacionales que coadyuvan a la formación de nuevos sitios con inestabilidad de ladera (Tabla 6).

**Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.):** Posee una accesibilidad por terracerías, brechas y carreteras. Sus pendientes son mayormente menores a  $6^\circ$ , aunque se llegan a presentar sitios con hasta  $62^\circ$  en la zona de contacto con los lomeríos basálticos. Tiene una buena calidad del suelo con una alta concentración de bases intercambiables (51-417 mol<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>). Tiene un buen recurso potencial arbóreo al este de la geoforma, caracterizado por una alta abundancia arbórea (36-136 individuos por cuadrante), pero también tiene un alto aprovechamiento forestal, con la presencia de árboles quemados (0-15 individuos) y ramoneados (10-60 individuos). La intervención forestal es más evidente al sur, con la presencia de actividades agrícolas (100% de los sitios adyacentes a puntos de muestreo) y pecuarias en el 77.7% de los cuadrantes. En cuanto a la estructura del suelo propensa a procesos gravitacionales, la densidad aparente es de baja a media y la estabilidad de agregados es mediana a alta. La mesa volcánica ha tenido un uso de suelo mayormente agrícola, por lo que la propensión de cambio de uso de suelo tendría una dirección hacia usos de suelo urbano, por otro lado, las zonas que aún conservan vegetación natural y tienen una alta abundancia arbórea, presentan una perturbación considerable debido al aprovechamiento forestal y la intervención con actividades agrícolas y pecuarias. En la propensión a inestabilidad de ladera, esta sería más común en los sitios con alta pendiente, baja densidad aparente y alta perturbación por aprovechamiento e intervención forestal, derivada de su cercanía con las poblaciones Paso de Carretas y Plan de Capulín.

**Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno):** Tienen una alta accesibilidad por terracerías y pendientes de entre  $5^\circ$  y  $70^\circ$ . En la estructura del suelo el sector norte posee los valores más altos de volumen total de poros (50.1-60.75%). Tienen un buen recurso potencial arbóreo con la mayor abundancia de toda la subcuenca (34-163 individuos) y alta talla arbórea (12-30 m). El aprovechamiento forestal es alto a noreste por la presencia del mayor ramoneo de toda la subcuenca

(5-65 individuos por cuadrante). La intervención forestal es alta en función de que el 91.6% de los cuadrantes tienen adyacencia con actividades agrícolas. En la estructura del suelo propensa a procesos gravitacionales, muestran una considerable variabilidad en conductividad hidráulica (media a extremadamente alta) y tienen los segundos valores más altos en erosionabilidad de toda la subcuenca (0.1-0.26 K). Los lomeríos basálticos presentan una propensión al cambio de uso de suelo considerable debido al establecimiento de nuevos campos de cultivo y al aprovechamiento forestal. En cuanto a la propensión a inestabilidad de ladera, esta ocurriría principalmente en sitios con fuertes pendientes expuestas al aprovechamiento forestal y la presencia de nuevos campos agrícolas, situación que actualmente se traduce la presencia de sitios con pérdida de horizontes superficiales de suelo, lo que se refleja en los altos valores de erosionabilidad para la geoforma.

***Ladera de montaña de caliza (Cretácico):*** Su accesibilidad es solo por terracerías y carreteras al norte y noreste de la geoforma. Se caracteriza por tener mayormente pendientes de entre 16 y 72°. Posee una buena estructura del suelo al norte, con valores de capacidad de agua disponible altos (55-347 L/m<sup>2</sup>) y capacidad de campo alta (169-621 L/m<sup>2</sup>). Tiene sitios con buena calidad del suelo en función de la concentración de bases intercambiables (10-453 mol<sub>c</sub>/m<sup>2</sup>). El recurso potencial arbóreo es bueno ya que tiene la mayor riqueza por cuadrante de toda la subcuenca (2 a 10 especies) y una alta abundancia arbórea (52- 131 individuos). El aprovechamiento forestal es alto al sureste de la geoforma, en él se muestran los valores más altos de ocoteo (0-30 individuos por cuadrante) y tala (0-25 individuos) de toda la subcuenca. La intervención forestal muestra una alta reforestación (53.3% de los cuadrantes completos). En el relieve propenso a procesos gravitacionales se muestra que un 20.12% del área se orienta al norte, la densidad aparente es baja a media, la profundidad de raíces es alta (40-140 cm) y la textura de suelos es muy variable (22.3-67% de arena). Su propensión a cambio de uso de suelo agrícola se restringe a las zonas con presencia de caminos y bajas pendientes. Es una geoforma con alta riqueza y abundancia de árboles, sin embargo, el aprovechamiento forestal es considerable dados los valores de ocoteo y tala de árboles, situación que deriva de la alta reforestación en un área no protegida, con lo cual se da un manejo forestal legal pero intensivo. En la propensión a inestabilidad de ladera, se observa que esta ocurre en sitios con fuertes pendientes, baja densidad aparente y alta profundidad de raíces, entorno que facilita la formación de procesos gravitacionales en temporada de lluvias tal y como ya ha venido ocurriendo desde 1994 (Tabla 6).

**Lomeríos de caliza (Mioceno-Plioceno):** Su accesibilidad es solo por una carretera que se ubica al este de la geoforma. Sus pendientes están entre 6 a 55°. Presenta una calidad del suelo en el sector norte que se caracteriza por tener sitios con valores bajos de capacidad de disponibilidad de agua (109-195 L/m<sup>2</sup>) y capacidad de campo (54-467 L/m<sup>2</sup>). En la calidad de suelo obtuvo los valores más bajos de toda la subcuenca, en cuanto a bases intercambiables (8-86 mol./m<sup>2</sup>), concentración de fósforo (45-137 g/m<sup>2</sup>), concentración de nitrógeno disponible (1-4 g/m<sup>2</sup>) y concentración de humus (4-14 kg/m<sup>2</sup>). El aprovechamiento forestal muestra valores considerables para el ocoteo y tala de árboles (0-15 individuos por cuadrantes para ambas variables). La intervención forestal es alta al oeste, con actividades agrícolas adyacentes al 86.6% de los cuadrantes muestreado, con actividades pecuarias en el 86.6% de los cuadrantes y algunos cuadrantes con poca hojarasca 15-100%. En el relieve propenso a inestabilidad de ladera, destacan 2.64 km<sup>2</sup> con orientación norte, 0.94 km<sup>2</sup> de área cercana a procesos gravitacionales y una protección arbórea la menor 0.87 km<sup>2</sup>; así como cuadrantes con alta densidad aparente, alta estabilidad de agregados y profundidad de raíces muy variable (14-125 cm), la cual responde principalmente a la densidad aparente alta o a horizontes de suelo incipientes. La geoforma de lomeríos de caliza muestra que la propensión a cambio de uso de suelo, está en función del aprovechamiento forestal dados los valores de ocoteo y tala de árboles; no obstante, a pesar de tener valores altos en actividades pecuarias y agrícolas, estas últimas no prosperan debido a que la geoforma posee suelos con poca humedad y poca fertilidad, situación que deriva en un posterior abandono de los campos de cultivo. La propensión a inestabilidad de ladera se puede inferir que ocurre en sitios con suelos compactos, poco permeables, con alta densidad aparente, orientación norte y procesos gravitacionales previos (1994-2012), los cuales durante la temporada de lluvias no son capaces de expulsar el agua excedente y tienden a colapsar.

### **3.3 Susceptibilidad a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo**

Para poder analizar los datos obtenidos de la evaluación multicriterio y el grado de susceptibilidad a procesos gravitacionales por clase de intensidad, se describen los resultados primero por clase de intensidad para cada variable cartográfica; y posteriormente, para cada variable cartográfica.

#### **3.3.1 Susceptibilidad por clases de intensidad**

##### **a) Cambio de cobertura vegetal (2003 y 2012)**

El mapa de cambio de uso de suelo ya contaba con una segmentación de zonas de degradación, zonas de recuperación y zonas de estabilidad, es por ello que para realizar el análisis multicriterio se

retomaron esos segmentos en tres clases de intensidad: degradación, recuperación y estabilidad. A esas clases se les calculó el área de incidencia en cada geoforma y se establecieron los valores en la matriz de jerarquización analítica de acuerdo a los criterios propuestos por Roa (2007). También se consideraron a las superficies de las clases de intensidad y a la superficie de incidencia de procesos gravitacionales (1994-2012), para determinar su contribución para la formación de nuevos procesos gravitacionales.

Para la geoforma CLSN, el área de las clases de intensidad fue mayor en la estabilidad (1.312 km<sup>2</sup>), seguida por la recuperación (0.250 km<sup>2</sup>) y la degradación (0.210 km<sup>2</sup>). La degradación tiene una moderada preferencia sobre la recuperación y una fuerte preferencia sobre la estabilidad, mientras que la recuperación tiene una moderada preferencia sobre la estabilidad. Los pesos relativos fueron 0.529 para la degradación, 0.309 para la recuperación y 0.162 para la estabilidad (Tabla 30).

En la CL solo se observó que la clase estabilidad tiene mayor incidencia (3.515 km<sup>2</sup>), le siguen la recuperación (0.656 km<sup>2</sup>) y la degradación (0.495 km<sup>2</sup>). La degradación tuvo una moderada preferencia sobre la recuperación y una fuerte preferencia sobre la estabilidad, en el caso de la recuperación se determinó una fuerte preferencia sobre la estabilidad. Los pesos relativos fueron mayores para la degradación (0.493) y la recuperación (0.370), respecto a la estabilidad (0.137) (Tabla 30).

Para la geoforma RP la clase estabilidad tiene más superficie (2.516 km<sup>2</sup>), le continúan la recuperación (0.457 km<sup>2</sup>) y la degradación (0.301 km<sup>2</sup>). La degradación tuvo una moderada preferencia sobre la recuperación y una fuerte preferencia sobre la estabilidad, en tanto que la recuperación tiene una fuerte preferencia sobre la estabilidad. Los pesos relativos fueron 0.493 para degradación, 0.370 para recuperación y 0.137 para estabilidad (Tabla 30).

La geoforma RPI tiene 21.006 km<sup>2</sup> de estabilidad, 2.618 km<sup>2</sup> de degradación y 2.184 km<sup>2</sup>. En la degradación se observó una fuerte preferencia sobre la recuperación y una absoluta preferencia sobre la estabilidad, mientras que la recuperación tiene una absoluta preferencia sobre la estabilidad. En la degradación el peso relativo fue de 0.539, en la recuperación fue de 0.360 y en la estabilidad fue de 0.101 (Tabla 30).

En la MV se observaron 6.869 km<sup>2</sup> de estabilidad, 0.835 km<sup>2</sup> de recuperación y 0.358 km<sup>2</sup> de degradación. La degradación tuvo una fuerte preferencia sobre la recuperación y una absoluta preferencia sobre la estabilidad, para la recuperación se determinó una fuerte preferencia sobre la estabilidad. Los pesos relativos van de 0.575 para la degradación, 0.311 para la recuperación y 0.114 para la estabilidad (Tabla 30).

La geoforma de LB muestra 3.512 km<sup>2</sup> de estabilidad, 0.991 km<sup>2</sup> de recuperación y 0.397 km<sup>2</sup> de degradación. La degradación obtuvo una fuerte preferencia sobre la recuperación y una absoluta preferencia sobre la estabilidad, en tanto que la recuperación tuvo una moderada preferencia sobre la estabilidad. Los pesos relativos son mayores en la degradación (0.611) y en la recuperación (0.255), en relación a la estabilidad (0.134) (Tabla 30). Para la LMC se encontraron 13.651 km<sup>2</sup> de estabilidad, 4.059 km<sup>2</sup> de recuperación y 1.789 km<sup>2</sup> de degradación. La degradación tuvo una moderada preferencia sobre la recuperación y una fuerte preferencia sobre la estabilidad, mientras que la recuperación tuvo una moderada preferencia sobre la estabilidad. Los pesos relativos son 0.529 para la degradación, 0.309 recuperación y 0.162 para estabilidad (Tabla 30). Por último, LC caliza tienen 8.428 km<sup>2</sup> de estabilidad, 1.428 km<sup>2</sup> de recuperación y 1.328 km<sup>2</sup> de degradación. La degradación tuvo una moderada preferencia sobre la recuperación y una fuerte preferencia sobre la estabilidad, en tanto que la recuperación se evaluó con una moderada preferencia sobre la estabilidad. Los pesos relativos fueron mayores en la degradación (0.529) y la recuperación (0.309), respecto a la estabilidad (0.162) (Tabla 30).

**Tabla 30.** Matrices de jerarquización analítica para cambios de uso de suelo 2003-2012.

<b>Cambio de uso de suelo 2003-2012 CLSN.</b>	<b>Degradación</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Estabilidad</b>	$\Sigma_{sj}/n$	<b>Peso relativo (<math>\Sigma_{xj}/n/\Sigma(\Sigma_{xj}/n)</math>)</b>
Degradación	1	2	3	1.20	0.529
Recuperación	0.50	1	2	0.70	0.309
Estabilidad	0.33	0.50	1	0.37	0.162
			$\Sigma(\Sigma_{xj}/n)$	2.27	1.000
<b>Cambio de uso de suelo 2003-2012 CL.</b>	<b>Degradación</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Estabilidad</b>	$\Sigma_{sj}/n$	<b>Peso relativo (<math>\Sigma_{xj}/n/\Sigma(\Sigma_{xj}/n)</math>)</b>
Degradación	1	2	3	1.20	0.493
Recuperación	0.50	1	3	0.90	0.370
Estabilidad	0.33	0.33	1	0.33	0.137
			$\Sigma(\Sigma_{xj}/n)$	2.43	1.000
<b>Cambio de uso de suelo 2003-2012 RP.</b>	<b>Degradación</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Estabilidad</b>	$\Sigma_{sj}/n$	<b>Peso relativo (<math>\Sigma_{xj}/n/\Sigma(\Sigma_{xj}/n)</math>)</b>
Degradación	1	2	3	1.20	0.493
Recuperación	0.50	1	3	0.90	0.370
Estabilidad	0.33	0.33	1	0.33	0.137
			$\Sigma(\Sigma_{xj}/n)$	2.43	1.000
<b>Cambio de uso de suelo 2003-2012 RPI.</b>	<b>Degradación</b>	<b>Recuperación</b>	<b>Estabilidad</b>	$\Sigma_{sj}/n$	<b>Peso relativo (<math>\Sigma_{xj}/n/\Sigma(\Sigma_{xj}/n)</math>)</b>
Degradación	1	3	4	1.60	0.539
Recuperación	0.33	1	4	1.07	0.360
Estabilidad	0.25	0.25	1	0.30	0.101
			$\Sigma(\Sigma_{xj}/n)$	2.97	1.000



**Tabla 30 (Continuación).** Matrices de jerarquización analítica para cambios de uso de suelo 2003-2012.

Cambio de uso de suelo 2003-2012 MV.	Degradación	Recuperación	Estabilidad	$\Sigma_{xj/n}$	Peso relativo $(\Sigma_{xj/n})/\Sigma(\Sigma_{xj/n})$
Degradación	1	3	4	1.60	0.575
Recuperación	0.33	1	3	0.87	0.311
Estabilidad	0.25	0.33	1	0.32	0.114
			$\Sigma(\Sigma_{xj/n})$	2.78	1.000

Cambio de uso de suelo 2003-2012 LB.	Degradación	Recuperación	Estabilidad	$\Sigma_{xj/n}$	Peso relativo $(\Sigma_{xj/n})/\Sigma(\Sigma_{xj/n})$
Degradación	1	3	4	1.60	0.611
Recuperación	0.33	1	2	0.67	0.255
Estabilidad	0.25	0.50	1	0.35	0.134
			$\Sigma(\Sigma_{xj/n})$	2.62	1.000

Cambio de uso de suelo 2003-2012 LMC.	Degradación	Recuperación	Estabilidad	$\Sigma_{xj/n}$	Peso relativo $(\Sigma_{xj/n})/\Sigma(\Sigma_{xj/n})$
Degradación	1	2	3	1.20	0.529
Recuperación	0.50	1	2	0.70	0.309
Estabilidad	0.33	0.50	1	0.37	0.162
			$\Sigma(\Sigma_{xj/n})$	2.27	1.000

Cambio de uso de suelo 2003-2012 LC.	Degradación	Recuperación	Estabilidad	$\Sigma_{xj/n}$	Peso relativo $(\Sigma_{xj/n})/\Sigma(\Sigma_{xj/n})$
Degradación	1	2	3	1.20	0.529
Recuperación	0.50	1	2	0.70	0.309
Estabilidad	0.33	0.50	1	0.37	0.162
			$\Sigma(\Sigma_{xj/n})$	2.27	1.000

**CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

En las evaluaciones para obtener el grado de susceptibilidad se consideró la superficie que cubren las clases en el cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012, así como el área removida por los procesos gravitacionales en cada una de las geoformas. En todas las geoformas la clase de intensidad degradación obtuvo una susceptibilidad muy alta (grado 5) a procesos gravitacionales. Mientras que la clase estabilidad mostro en la mayoría de las geoformas una susceptibilidad a procesos gravitacionales baja (grado 2), a excepción de la geoforma MV que presento una susceptibilidad muy baja (grado 1). En el caso de la clase recuperación, esta tuvo dos distintos grados de susceptibilidad dependiendo de la geoforma, por lo que en la CL, RP y RPI mostro una susceptibilidad alta (grado 4), en tanto que para las geoformas CLSN, MV, LB, LMC y LC la susceptibilidad es media (grado 3) (Tabla 31).

**Tabla 31.** Susceptibilidad para el cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012.

Cambios de uso de suelo CLSN	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Degradación	0.210	0.003	1.219	0.529	5	0-0.106	1
Recuperación	0.250	0.001	0.329	0.309	3	0.106-0.212	2
Estabilidad	1.312	0	0	0.162	2	0.212-0.318	3
						0.318-0.424	4
						0.424-0.53	5

Cambios de uso de suelo CL	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Degradación	0.495	0.014	2.844	0.493	5	0-0.1	1
Recuperación	0.656	0.001	0.081	0.370	4	0.1-0.2	2
Estabilidad	3.515	0.007	0.197	0.137	2	0.2-0.3	3
						0.3-0.4	4
						0.4-0.5	5

Cambios de uso de suelo RP	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Degradación	0.301	0.000	0.089	0.493	5	0-0.1	1
Recuperación	0.457	0.002	0.403	0.370	4	0.1-0.2	2
Estabilidad	2.516	0.010	0.409	0.137	2	0.2-0.3	3
						0.3-0.4	4
						0.4-0.5	5

Cambios de uso de suelo RPI	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Degradación	2.618	0.042	1.603	0.539	5	0-0.108	1
Recuperación	2.184	0.060	2.726	0.360	4	0.108-0.216	2
Estabilidad	21.006	0.213	1.016	0.101	2	0.216-0.324	3
						0.324-0.432	4
						0.432-0.54	5

Cambios de uso de suelo MV	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Degradación	0.358	0.00003	0.008	0.575	5	0-0.116	1
Recuperación	0.835	0	0	0.311	3	0.116-0.232	2
Estabilidad	6.869	0.002	0.036	0.114	1	0.232-0.348	3
						0.348-0.464	4
						0.464-0.58	5

Cambios de uso de suelo LB	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Degradación	0.397	0.000066	0.017	0.611	5	0-0.124	1
Recuperación	0.991	0	0	0.255	3	0.124-0.248	2
Estabilidad	3.512	0.001	0.035	0.134	2	0.248-0.372	3
						0.372-0.496	4
						0.496-0.62	5

**Tabla 31 (Continuación).** Susceptibilidad para el cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012.

Cambios de uso de suelo LMC	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Degradación	1.789	0.023	1.271	0.529	5	0-0.106	1
Recuperación	4.059	0.026	0.651	0.309	3	0.106-0.212	2
Estabilidad	13.651	0.026	0.194	0.162	2	0.212-0.318	3
						0.318-0.424	4
						0.424-0.53	5

Cambios de uso de suelo LC	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Degradación	1.328	0.043	3.224	0.529	5	0-0.106	1
Recuperación	1.428	0.029	2.010	0.309	3	0.106-0.212	2
Estabilidad	8.428	0.079	0.939	0.162	2	0.212-0.318	3
						0.318-0.424	4
						0.424-0.53	5

**CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

En síntesis, los resultados muestran que las clases de intensidad dominantes en el cambio de uso de suelo son la degradación y la recuperación, las cuales obtuvieron un peso relativo mayor en todas las geoformas. Sin embargo, al compararlas con las superficies removidas por procesos gravitacionales, no en todos los casos coinciden con los grados de susceptibilidad altos. Por ejemplo, en la geoforma de RPI hay una mayor superficie removida por procesos gravitacionales en la clase estabilidad y el grado de susceptibilidad indica que es bajo. Lo anterior responde a que el área que representan los procesos gravitacionales (0.213 km<sup>2</sup>) respecto a toda el área que ocupa la estabilidad (21 km<sup>2</sup>) es mínima; por lo que, al comparar las áreas de degradación y recuperación con las áreas removidas en procesos gravitacionales, estas tienen una mayor proporción respecto a las áreas con estabilidad.

### 3.3.2 Clases de intensidad para procesos gravitacionales (1994-2012)

El mapa de procesos gravitacionales muestra una clasificación por tipos de procesos gravitacionales, es por ello que se retoma para realizar el análisis multicriterio y se establecen las clases de intensidad en: caídas de rocas, deslizamientos de asentamiento profundo, deslizamientos de escombros, deslizamientos someros, flujos de escombros y flujos de tierra. Con estas clases se evaluó la matriz de jerarquización analítica de acuerdo a los criterios de Roa, 2007, para ello se consideró toda la superficie removida por procesos gravitacionales (1994-2012) y la superficie de cada clase de intensidad para cada geoforma.

En la geoforma CLSN solo se encontró la clase caídas de rocas (0.0034 km<sup>2</sup>). Es por ello que esta clase tuvo una absoluta preferencia sobre las demás, y en el resto de las clases se estableció una igual preferencia para todas. El peso relativo para caídas de rocas fue 0.444 y 0.111 para las clases restantes (Tabla 32). En la CL se observaron deslizamientos someros (0.021 km<sup>2</sup>), flujos de escombros (0.001 km<sup>2</sup>) y caídas de rocas (0.0002 km<sup>2</sup>). Los deslizamientos someros tuvieron una fuerte preferencia sobre los flujos de escombros y absoluta preferencia sobre las clases restantes. Los flujos de escombros se evaluaron con una igual preferencia sobre las caídas de rocas y absoluta preferencia sobre las demás, en el resto de las clases se consideró una igual preferencia. Los pesos relativos fueron 0.377 para los deslizamientos someros, 0.270 para los flujos de escombros, 0.99 para las caídas de rocas y 0.085 para las otras clases (Tabla 32).

Para la geoforma RP la clase más dominante es la de deslizamientos someros (0.009 km<sup>2</sup>), caída de rocas (0.0073 km<sup>2</sup>), flujos de escombros (0.001 km<sup>2</sup>) y deslizamientos de escombros (0.001 km<sup>2</sup>). Los deslizamientos someros se evaluaron con moderada preferencia sobre las caídas de rocas, con fuerte preferencia sobre los flujos de escombros y con absoluta preferencia sobre el resto de las clases; las caídas de rocas obtuvieron una fuerte preferencia sobre los flujos de escombros y absoluta preferencia sobre las demás clases. Los flujos de escombros tuvieron una moderada preferencia sobre los deslizamientos de escombros y absoluta preferencia en las clases restantes. En las otras clases se vio una igual preferencia entre ellas. Los pesos relativos fueron 0.312 para deslizamientos someros, 0.286 para caídas de rocas, 0.202 para flujos de escombros, 0.069 para deslizamientos de escombros y 0.065 para todas las otras clases (Tabla 32).

En la geoforma RPI se ubicaron caídas de rocas (0.220 km<sup>2</sup>), flujos de escombros (0.065 km<sup>2</sup>), deslizamientos someros (0.053 km<sup>2</sup>), deslizamiento de escombros (0.034 km<sup>2</sup>) y deslizamientos de asentamiento profundo (0.016 km<sup>2</sup>). Las caídas de rocas tienen moderada preferencia sobre los flujos de escombros, fuerte preferencia sobre los deslizamientos someros, y absoluta preferencia sobre las demás clases. Los flujos de escombros tienen una fuerte preferencia sobre los deslizamientos someros y los deslizamientos de escombros, y una absoluta preferencia sobre las otras clases. Los deslizamientos someros tienen una moderada preferencia sobre los deslizamientos de escombros, una fuerte preferencia sobre los deslizamientos de asentamiento profundo, y una absoluta preferencia sobre los flujos de tierra; los deslizamientos de escombros tienen una moderada preferencia sobre los deslizamientos de asentamiento profundo y una absoluta preferencia sobre los flujos de tierra; y los deslizamientos de asentamiento profundo tienen una igual preferencia sobre los flujos de tierra. Los pesos relativos son 0.31 para las caídas de rocas, 0.26 para

los flujos de escombros, 0.18 para los deslizamientos someros, 0.14 para los deslizamientos de escombros, 0.06 para los deslizamientos de asentamiento profundo y 0.05 para los flujos de tierra (Tabla 32). Para la geoforma la MV se observaron deslizamientos someros (0.008 km<sup>2</sup>) y flujos de escombros (0.002 km<sup>2</sup>). Los deslizamientos someros se evaluaron con fuerte preferencia sobre los flujos de escombros y absoluta preferencia en las otras clases; los flujos de escombros tuvieron una absoluta preferencia sobre las demás clases; y en las clases restantes se tuvo una igual preferencia para todas. Los pesos relativos fueron 0.36 para deslizamiento somero, 0.313 para flujos de escombros y 0.081 para el resto de las clases (Tabla 32).

La geoforma de LB mostro la presencia de las clases deslizamiento somero (0.002 km<sup>2</sup>) y flujos de escombros (0.001 km<sup>2</sup>). Los deslizamientos someros tienen una moderada preferencia sobre los flujos de escombros y una absoluta preferencia sobre las demás clases; los flujos de escombros tienen una absoluta preferencia sobre las otras clases; y en el resto de las clases se obtuvo una igual preferencia entre ellas. Los pesos relativos son 0.35 para los deslizamientos someros, 0.32 para los flujos de escombros y 0.083 en el resto de las clases (Tabla 32).

Para la LMC se encontraron deslizamientos someros (0.051 km<sup>2</sup>), flujos de escombros (0.017 km<sup>2</sup>), flujos de tierra (0.015 km<sup>2</sup>), deslizamientos de escombros (0.013 km<sup>2</sup>) y caídas de rocas (0.006 km<sup>2</sup>). Los deslizamientos someros tuvieron una moderada preferencia sobre los flujos de escombros y una absoluta preferencia sobre las demás clases. Los flujos de escombros se evaluaron con moderada preferencia sobre los flujos de tierra y deslizamientos de escombros, una fuerte preferencia sobre las caídas de rocas y una absoluta preferencia sobre los deslizamientos de asentamiento profundo. En los flujos de tierra se observó una moderada preferencia sobre los deslizamientos de escombros, fuerte preferencia sobre las caídas de rocas y absoluta preferencia sobre los deslizamientos de asentamiento profundo. Los deslizamientos de escombros presentaron una fuerte preferencia sobre las caídas de rocas y absoluta preferencia sobre los deslizamientos de asentamiento profundo. Finalmente, en las caídas de rocas se dio una absoluta preferencia sobre los deslizamientos de asentamiento profundo. Los pesos relativos son 0.329 en deslizamientos someros, 0.203 en flujos de escombros, 0.177 en flujos de tierra, 0.152 en deslizamientos de escombros, 0.103 en caídas de rocas y 0.037 en deslizamientos de asentamiento profundo (Tabla 32).

Por último, los LC presentaron 0.085 km<sup>2</sup> de flujos de escombros, 0.061 km<sup>2</sup> de deslizamientos someros, 0.042 km<sup>2</sup> de deslizamientos de escombros y 0.004 km<sup>2</sup> de flujos de tierra. En los flujos de escombros se vio una moderada preferencia sobre los deslizamientos someros, una fuerte preferencia sobre los deslizamientos de escombros y los flujos de tierra y una absoluta preferencia sobre las

caídas de rocas y deslizamientos de asentamiento profundo. Los deslizamientos someros muestran una moderada preferencia sobre los deslizamientos de escombros, una fuerte preferencia sobre los flujos de tierra y caídas de roca, y una absoluta preferencia sobre los deslizamientos de asentamiento profundo. Los deslizamientos de escombros se observa una moderada preferencia sobre los flujos de tierra y una absoluta preferencia sobre las caídas de rocas y deslizamientos de asentamiento profundo; los flujos de tierra denotan una absoluta preferencia sobre las caídas de rocas y deslizamientos de asentamiento profundo; y en el resto de las clases es igual la preferencia entre ellas. Los pesos relativos son 0.290 para los flujos de escombros, 0.230 para los deslizamientos someros, 0.202 para deslizamientos de escombros, 0.174 para los flujos de tierra, 0.053 para las caídas de rocas y 0.051 para los deslizamientos de asentamiento profundo (Tabla 32).

**Tabla 32.** Matrices de jerarquización analítica para procesos gravitacionales 1994-2012.

Procesos gravitacionales CLSN.	Caída de rocas	D. Asentamiento profundo	D. Escombros	D. Somero	Flujos de escombros	Flujos de tierra	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo $(\Sigma x_j/n)/\Sigma(\Sigma x_j/n)$	
Caída de rocas	1	4	4	4	4	4	4.2	0.444	
D. Asentamiento profundo	0.25	1	1	1	1	1	1.05	0.111	
D. Escombros	0.25	1	1	1	1	1	1.05	0.111	
D. Somero	0.25	1	1	1	1	1	1.05	0.111	
Flujos de escombros	0.25	1	1	1	1	1	1.05	0.111	
Flujos de tierra	0.25	1	1	1	1	1	1.05	0.111	
							$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	9.45	1.000
Procesos gravitacionales CL.	D. Somero	Flujos de escombros	Caída de rocas	D. Asentamiento profundo	D. Escombros	Flujos de tierra	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo $(\Sigma x_j/n)/\Sigma(\Sigma x_j/n)$	
D. Somero	1	3	4	4	4	4	4.00	0.377	
Flujos de escombros	0.33	1	1	4	4	4	2.87	0.270	
Caída de rocas	0.25	1	1	1	1	1	1.05	0.099	
D. Asentamiento profundo	0.25	0.25	1	1	1	1	0.90	0.085	
D. Escombros	0.25	0.25	1	1	1	1	0.90	0.085	
Flujos de tierra	0.25	0.25	1	1	1	1	0.90	0.085	
							$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	10.62	1.000
Procesos gravitacionales RP.	D. Somero	Caída de rocas	Flujos de escombros	D. Escombros	D. Asentamiento profundo	Flujos de tierra	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo $(\Sigma x_j/n)/\Sigma(\Sigma x_j/n)$	
D. Somero	1	2	3	4	4	4	3.60	0.312	
Caída de rocas	0.5	1	3	4	4	4	3.30	0.286	
Flujos de escombros	0.33	0.33	1	2	4	4	2.33	0.202	
D. Escombros	0.25	0.25	0.5	1	1	1	0.80	0.069	
D. Asentamiento profundo	0.25	0.25	0.25	1	1	1	0.75	0.065	
Flujos de tierra	0.25	0.25	0.25	1	1	1	0.75	0.065	
							$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	11.53	1.000

**Tabla 32 (Continuación).** Matrices de jerarquización analítica para procesos gravitacionales 1994-2012.

Procesos gravitacionales RPI.	Caída de rocas	Flujos de escombros	D. Someros	D. Escombros	D. Asentamiento profundo	Flujos de tierra	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo $(\Sigma x_j/n)/\Sigma(\Sigma x_j/n)$	
Caída de rocas	1	2	3	4	4	4	3.60	0.307	
Flujos de escombros	0.5	1	3	3	4	4	3.10	0.265	
D. Someros	0.33	0.33	1	2	3	4	2.13	0.182	
D. Escombros	0.25	0.33	0.5	1	2	4	1.62	0.138	
D. Asentamiento profundo	0.25	0.25	0.33	0.5	1	1	0.67	0.057	
Flujos de tierra	0.25	0.25	0.25	0.25	1	1	0.60	0.051	
							$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	11.72	1.000
Procesos gravitacionales MV.	D. Somero	Flujos de escombros	D. Escombros	Caída de rocas	D. Asentamiento profundo	Flujos de tierra	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo $(\Sigma x_j/n)/\Sigma(\Sigma x_j/n)$	
D. Somero	1	3	4	4	4	4	4.00	0.361	
Flujos de escombros	0.33	1	4	4	4	4	3.47	0.313	
D. Escombros	0.25	0.25	1	1	1	1	0.90	0.081	
Caída de rocas	0.25	0.25	1	1	1	1	0.90	0.081	
D. Asentamiento profundo	0.25	0.25	1	1	1	1	0.90	0.081	
Flujos de tierra	0.25	0.25	1	1	1	1	0.90	0.081	
							$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	11.07	1.000
Procesos gravitacionales LB.	D. Somero	Flujos de escombros	D. Escombros	Caída de rocas	D. Asentamiento profundo	Flujos de tierra	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo $(\Sigma x_j/n)/\Sigma(\Sigma x_j/n)$	
D. Somero	1	2	4	4	4	4	3.8	0.349	
Flujos de escombros	0.5	1	4	4	4	4	3.5	0.321	
D. Escombros	0.25	0.25	1	1	1	1	0.9	0.083	
Caída de rocas	0.25	0.25	1	1	1	1	0.9	0.083	
D. Asentamiento profundo	0.25	0.25	1	1	1	1	0.9	0.083	
Flujos de tierra	0.25	0.25	1	1	1	1	0.9	0.083	
							$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	10.9	1.000
Procesos gravitacionales LMC.	D. Somero	Flujos de escombros	Flujos de tierra	D. Escombros	Caída de rocas	D. Asentamiento profundo	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo $(\Sigma x_j/n)/\Sigma(\Sigma x_j/n)$	
D. Somero	1	3	4	4	4	4	4.00	0.329	
Flujos de escombros	0.33	1	2	2	3	4	2.47	0.203	
Flujos de tierra	0.25	0.5	1	2	3	4	2.15	0.177	
D. Escombros	0.25	0.5	0.5	1	3	4	1.85	0.152	
Caída de rocas	0.25	0.33	0.33	0.33	1	4	1.25	0.103	
D. Asentamiento profundo	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	1	0.45	0.037	
							$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	12.17	1.000

**Tabla 32 (Continuación).** Matrices de jerarquización analítica para procesos gravitacionales 1994-2012.

Procesos gravitacionales LC.	Flujos de escombros	D. Somero	D. Escombros	Flujos de tierra	Caída de rocas	D. Asentamiento profundo	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n/\Sigma(\Sigma x_j/n)$ )	
Flujos de escombros	1	2	3	3	4	4	3.40	0.290	
D. Somero	0.5	1	2	3	3	4	2.70	0.230	
D. Escombros	0.33	0.5	1	2	4	4	2.37	0.202	
Flujos de tierra	0.33	0.33	0.5	1	4	4	2.03	0.174	
Caída de rocas	0.25	0.33	0.25	0.25	1	1	0.62	0.053	
D. Asentamiento profundo	0.25	0.25	0.25	0.25	1	1	0.60	0.051	
							$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	11.72	1.000

**CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

Para obtener el grado de susceptibilidad se consideró la superficie que cubren todas las clases de procesos gravitacionales 1994-2012 juntas en una geoforma, así como el área removida cada una de las clases para cada geoforma. Estas superficies se compararon con los pesos relativos que se obtuvieron en la matriz de jerarquización analítica, y se determinó el grado de susceptibilidad del 1 al 5, siendo 1 susceptibilidad muy baja y 5 susceptibilidad muy alta a procesos gravitacionales.

Dado lo anterior, la clase de intensidad deslizamiento somero obtuvo en la mayoría de las geoformas una susceptibilidad muy alta (grado 5), a excepción de las geoformas LC con alta susceptibilidad (grado 4) y CLSN con baja susceptibilidad (grado 2). La clase flujos de escombros tuvo una susceptibilidad muy alta (grado 5) en las geoformas RPI, MV y LC. En las geoformas RP y LMC la susceptibilidad fue alta (grado 4). En las geoformas CLSN y CL la susceptibilidad fue baja (grado 2).

La clase caída de rocas mostro una muy alta (grado 5) susceptibilidad en las geoformas CLSN y RP; una alta susceptibilidad (grado 3) en la geoforma ladera de CL; una baja susceptibilidad (grado 2) en las geoformas RPI, MV, LB, LMC; y una muy baja susceptibilidad (grado 1) en los LC.

La clase deslizamientos de escombros tuvo una susceptibilidad alta (grado 4) en la geoforma LC, susceptibilidad media (grado 3) en las geoformas RPI y LMC, y susceptibilidad baja (grado 2) en el resto de las geoformas.

La clase flujos de tierra tiene susceptibilidad media (grado 3) en las geoformas LMC y LC, susceptibilidad baja (grado 2) en casi todas las geoformas restantes, a excepción de la RPI que obtuvo susceptibilidad muy baja (grado 1).



Por último, la clase deslizamientos de asentamiento profundo tuvo una susceptibilidad baja (grado 2) en las geoformas CLSN, CL, RP, MV y LB; y una susceptibilidad muy baja (grado 1) en las geoformas RPI, LMC y LC (Tabla 33).

**Tabla 33.** Susceptibilidad para procesos gravitacionales 1994-2012.

Procesos gravitacionales CLSN	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Caída de rocas	0.0034	0.0034	100	0.444	5	0-0.088	1
D. Asentamiento profundo	0	0	0	0.111	2	0.088-0.176	2
D. Escombros	0	0	0	0.111	2	0.176-0.264	3
D. Somero	0	0	0	0.111	2	0.264-0.352	4
Flujos de escombros	0	0	0	0.111	2	0.352-0.44	5
Flujos de tierra	0	0	0	0.111	2		
Procesos gravitacionales CL	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Caída de rocas	0.0215	0.0002	0.7289	0.270	4	0-0.076	1
D. Asentamiento profundo	0	0	0	0.085	2	0.076-0.152	2
D. Escombros	0	0	0	0.085	2	0.152-0.228	3
D. Somero	0.022	0.021	96.532	0.377	5	0.228-0.304	4
Flujos de escombros	0.022	0.001	2.739	0.099	2	0.304-0.38	5
Flujos de tierra	0	0	0	0.085	2		
Procesos gravitacionales RP	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Caída de rocas	0.019	0.0073	38.932	0.286	5	0-0.064	1
D. Asentamiento profundo	0.000	0	0	0.065	2	0.064-0.128	2
D. Escombros	0.019	0.001	4.016	0.069	2	0.128-0.192	3
D. Somero	0.019	0.009	49.704	0.312	5	0.192-0.256	4
Flujos de escombros	0.019	0.001	7.343	0.202	4	0.256-0.32	5
Flujos de tierra	0	0	0	0.065	2		
Procesos gravitacionales RPI	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Caída de rocas	0.387	0.220	56.856	0.138	2	0-0.062	1
D. Asentamiento profundo	0.387	0.016	4.103	0.057	1	0.062-0.124	2
D. Escombros	0.387	0.034	8.702	0.182	3	0.124-0.186	3
D. Somero	0.387	0.053	13.591	0.265	5	0.186-0.248	4
Flujos de escombros	0.387	0.065	16.747	0.307	5	0.248-0.31	5
Flujos de tierra	0	0	0	0.051	1		
Procesos gravitacionales MV	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Caída de rocas	0	0	0	0.081	2	0-0.074	1
D. Asentamiento profundo	0	0	0	0.081	2	0.074-0.148	2
D. Escombros	0	0	0	0.081	2	0.148-0.222	3
D. Somero	0.010	0.008	77.039	0.361	5	0.222-0.296	4
Flujos de escombros	0.010	0.002	22.961	0.313	5	0.296-0.37	5
Flujos de tierra	0	0	0	0.081	2		

**Tabla 33 (Continuación).** Susceptibilidad para procesos gravitacionales 1994-2012.

Procesos gravitacionales LB	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Caída de rocas	0	0	0	0.083	2	0-0.07	1
D. Asentamiento profundo	0	0	0	0.083	2	0.07-0.14	2
D. Escombros	0	0	0	0.083	2	0.14-0.21	3
D. Somero	0.0036	0.002	68.041	0.349	5	0.21-0.28	4
Flujos de escombros	0.0036	0.001	31.987	0.321	5	0.28-0.35	5
Flujos de tierra	0	0	0	0.083	2		
Procesos gravitacionales LMC	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Caída de rocas	0.101	0.006	5.857	0.103	2	0-0.066	1
D. Asentamiento profundo	0	0	0	0.037	1	0.066-0.132	2
D. Escombros	0.101	0.013	12.881	0.152	3	0.132-0.198	3
D. Somero	0.101	0.051	50.437	0.329	5	0.198-0.264	4
Flujos de escombros	0.101	0.017	16.445	0.203	4	0.264-0.33	5
Flujos de tierra	0.101	0.015	14.379	0.177	3		
Procesos gravitacionales LC	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Caída de rocas	0	0	0	0.053	1	0-0.06	1
D. Asentamiento profundo	0	0	0	0.051	1	0.06-0.12	2
D. Escombros	0.192	0.042	22.089	0.202	4	0.12-0.18	3
D. Somero	0.192	0.061	31.788	0.230	4	0.18-0.24	4
Flujos de escombros	0.192	0.085	44.274	0.290	5	0.24-0.30	5
Flujos de tierra	0.192	0.004	1.849	0.174	3		

**SN:** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka) **LH:** Ladera de lava del Holoceno **RP:** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.) **RPI:** Rampa piroclástica indiferenciada **MV:** Mesa volcánica **LB:** Lomeríos basáltico **LMC:** Ladera de montaña de roca caliza **LC:** Lomeríos de roca caliza.

Los resultados muestran que las clases de intensidad con mayor susceptibilidad en los procesos gravitacionales entre 1994-2012 son los deslizamientos someros y flujos de escombros, las cuales obtuvieron un peso relativo mayor en todas las geoformas. Además, al compararlas con las superficies removidas por procesos gravitacionales, en todos los casos coinciden con los grados de susceptibilidad altos y muy altos. Las demás clases la susceptibilidad es variable de acuerdo la geoforma en que se presente, pero destacan las clases deslizamientos de asentamiento profundo y flujos de tierra por tener una susceptibilidad de baja a muy baja en la mayoría de las geoformas.

#### b) Clases de intensidad para erosividad por lluvias (1968-1989)

En la variable cartográfica de erosividad muestra una escala de valores que va de 179 a 300 del índice de Fournier modificado. Para el análisis multicriterio esta escala se reclasificó en cinco clases de intensidad: Muy baja (179-203.2), Baja (203.2-227.4), Media (227.4-251.6), Alta (251.6-275.8) y Muy alta (275.8-300). A partir de estas clases de intensidad se asignaron los valores en la matriz

de jerarquización analítica de acuerdo a los criterios de Roa, 2007, considerando el área de cada clase de intensidad y el área removida por procesos gravitacionales (1994-2012).

En las CLSN solo se encontró la clase de intensidad muy baja (1.768 km<sup>2</sup>), por lo que en la matriz de jerarquización analítica la clase de intensidad muy baja tiene una absoluta preferencia sobre las demás clases, y en el resto de las clases se observa una igual preferencia entre ellas. Los pesos relativos son 0.5 en la clase muy baja y 0.125 en las clases restantes (Tabla 34).

En la CL se observó la presencia de las clases de intensidad muy baja (2.625 km<sup>2</sup>) y baja (2.039 km<sup>2</sup>). La clase muy baja tuvo una absoluta preferencia sobre las demás clases y en el resto de las clases se observó una igual preferencia entre ellas. Lo anterior debido a que en la clase baja no se encontró áreas removidas por procesos gravitacionales. Los pesos relativos son 0.5 para la clase muy baja y 0.125 en el resto de las clases (Tabla 34).

Para la geoforma RP se encontraron las clases de intensidad baja (2.652 km<sup>2</sup>) y muy baja (0.621 km<sup>2</sup>). La clase baja tuvo una moderada preferencia sobre la clase muy baja y una absoluta preferencia en el resto de las clases, en tanto que la clase muy baja tuvo absoluta preferencia sobre las demás, estas a su vez tuvieron una igual preferencia entre ellas. Así, sus pesos relativos son 0.385 en la clase muy baja, 0.346 en la clase baja y 0.090 en las demás clases (Tabla 34).

La geoforma RPI muestra las clases de intensidad baja (14.160 km<sup>2</sup>), media (8.977 km<sup>2</sup>) y muy baja (2.647 km<sup>2</sup>). La clase baja tiene una moderada preferencia sobre la clase media, fuerte preferencia sobre la clase muy baja y absoluta preferencia sobre las clases alta y muy alta. La clase media tiene una moderada preferencia sobre la clase muy baja y absoluta preferencia sobre las otras clases; en el resto de las clases la preferencia fue igual entre ellas. Los pesos relativos son 0.377 para la clase baja, 0.336 para la clase media, 0.099 para la clase muy baja y 0.094 para las demás clases (Tabla 34).

En la geoforma MV se observan las clases baja (3.894 km<sup>2</sup>), muy baja (3.422 km<sup>2</sup>) y media (0.736 km<sup>2</sup>). La clase baja tiene una fuerte preferencia sobre la muy baja y absoluta preferencia en las demás clases. La clase muy baja tuvo una absoluta preferencia sobre las otras clases; y en las clases restantes la preferencia fue igual. Los pesos relativos fueron 0.402 en la clase baja, 0.335 en la clase muy baja y 0.088 en el resto de las clases (Tabla 34).

Para los LB se encontró la presencia de las clases de intensidad baja (2.992 km<sup>2</sup>), muy baja (1.901 km<sup>2</sup>) y media (0.005 km<sup>2</sup>). La clase baja tuvo una moderada preferencia sobre la clase muy baja, fuerte preferencia sobre la clase media y una absoluta preferencia sobre las demás clases. La clase muy baja se evaluó con fuerte preferencia sobre la clase media y absoluta preferencia sobre las otras

clases; y en las clases restantes se tuvo una igual preferencia entre ellas. Los pesos relativos son 0.377 para la clase baja, 0.336 en la clase muy baja, 0.099 en la clase media y 0.094 en el resto de las clases (Tabla 34).

En la LMC se ubicaron las clases de intensidad media (9.313 km<sup>2</sup>), baja (5.989 km<sup>2</sup>), alta (4.081 km<sup>2</sup>) y muy baja (0.105 km<sup>2</sup>). La clase media tuvo una moderada preferencia sobre la clase baja, una fuerte preferencia sobre la clase alta y absoluta preferencia sobre las clases muy baja y muy alta. La clase baja mostro una fuerte preferencia sobre la clase alta y absoluta preferencia en las demás clases. La clase alta tuvo una moderada preferencia sobre la clase muy baja y absoluta preferencia sobre la clase muy alta; y entre las clases muy baja y muy alta se dio una igual preferencia. Los pesos relativos son 0.351 en la clase media, 0.313 en la clase baja, 0.192 en la clase alta, 0.075 en las clases muy baja y 0.069 en la clase muy alta (Tabla 34).

Finalmente, los LC se presentan las clases de intensidad alta (4.724 km<sup>2</sup>), baja (3.823 km<sup>2</sup>), muy alta (1.702 km<sup>2</sup>) y media (0.928 km<sup>2</sup>). La clase alta tiene moderada preferencia sobre la clase baja, una fuerte preferencia sobre la clase muy alta y absoluta preferencia sobre las demás clases. La clase baja mostro una fuerte preferencia sobre la clase muy alta y absoluta preferencia sobre las otras clases. La clase muy alta tiene una moderada preferencia sobre la clase media y absoluta preferencia sobre la clase muy baja; y la clase media tuvo una absoluta preferencia sobre la clase muy baja. Los pesos relativos son 0.332 en la clase alta, 0.296 en la clase baja, 0.182 en la clase muy alta, 0.142 en la clase media y 0.047 en la clase muy baja (Tabla 34).

**Tabla 34.** Matrices de jerarquización analítica para la erosividad.

Erosividad de lluvias CLSN.	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo $(\Sigma x_j/n)/\Sigma(\Sigma x_j/n)$
Muy baja	1	4	4	4	4	3.4	0.500
Baja	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
Media	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
Alta	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
Muy alta	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	1.000
						6.8	

Erosividad de lluvias CL.	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo $(\Sigma x_j/n)/\Sigma(\Sigma x_j/n)$
Muy baja	1	4	4	4	4	3.4	0.500
Baja	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
Media	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
Alta	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
Muy alta	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	1.000
						6.8	

**Tabla 34 (Continuación).** Matrices de jerarquización analítica para la erosividad.

Erosividad de lluvias RP.	Baja	Muy baja	Media	Alta	Muy alta	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n$ )/ $\Sigma(\Sigma x_j/n)$
Baja	1	2	4	4	4	3	0.385
Muy baja	0.5	1	4	4	4	2.7	0.346
Media	0.25	0.25	1	1	1	0.7	0.090
Alta	0.25	0.25	1	1	1	0.7	0.090
Muy alta	0.25	0.25	1	1	1	0.7	0.090
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	7.8
							1.000

Erosividad de lluvias RPI.	Baja	Media	Muy baja	Alta	Muy alta	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n$ )/ $\Sigma(\Sigma x_j/n)$
Baja	1	2	3	4	4	2.80	0.377
Media	0.5	1	3	4	4	2.50	0.336
Muy baja	0.33	0.33	1	1	1	0.73	0.099
Alta	0.25	0.25	1	1	1	0.70	0.094
Muy alta	0.25	0.25	1	1	1	0.70	0.094
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	7.43
							1.000

Erosividad de lluvias MV.	Baja	Muy baja	Media	Alta	Muy alta	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n$ )/ $\Sigma(\Sigma x_j/n)$
Baja	1	3	4	4	4	3.20	0.402
Muy baja	0.33	1	4	4	4	2.67	0.335
Media	0.25	0.25	1	1	1	0.70	0.088
Alta	0.25	0.25	1	1	1	0.70	0.088
Muy alta	0.25	0.25	1	1	1	0.70	0.088
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	7.97
							1.000

Erosividad de lluvias LB.	Baja	Muy baja	Media	Alta	Muy alta	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n$ )/ $\Sigma(\Sigma x_j/n)$
Baja	1	2	3	4	4	2.80	0.377
Muy baja	0.5	1	3	4	4	2.50	0.336
Media	0.33	0.33	1	1	1	0.73	0.099
Alta	0.25	0.25	1	1	1	0.70	0.094
Muy alta	0.25	0.25	1	1	1	0.70	0.094
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	7.43
							1.000

Erosividad de lluvias LMC.	Media	Baja	Alta	Muy baja	Muy alta	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n$ )/ $\Sigma(\Sigma x_j/n)$
Media	1	2	3	4	4	2.80	0.351
Baja	0.5	1	3	4	4	2.50	0.313
Alta	0.33	0.33	1	2	4	1.53	0.192
Muy baja	0.25	0.25	0.5	1	1	0.60	0.075
Muy alta	0.25	0.25	0.25	1	1	0.55	0.069
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	7.98
							1.000

Erosividad de lluvias LC.	Alta	Baja	Muy alta	Media	Muy baja	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n$ )/ $\Sigma(\Sigma x_j/n)$
Alta	1	2	3	4	4	2.8	0.332
Baja	0.5	1	3	4	4	2.5	0.296
Muy alta	0.33	0.33	1	2	4	1.53	0.182
Media	0.25	0.25	0.5	1	4	1.2	0.142
Muy baja	0.25	0.25	0.25	0.25	1	0.4	0.047
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	8.43
							1.000

CLSN. Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). CL. Colada de lava (16,500 años A.P.). RP. Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). RPI. Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). MV. Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). LB. Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). LMC. Ladera de montaña de calizas (Cretácico). LC. Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

La clase de intensidad de intensidad dominante en la subcuenca fue la clase baja, esta tuvo una susceptibilidad muy alta (grado 5) en las geoformas RP, RPI, MV, LB, LMC y LC. La susceptibilidad muy baja también tiene una amplia distribución en la subcuenca, obtuvo una susceptibilidad muy alta (grado 5) en las geoformas CLSN, CL, RP y LB. Otras dos clases que tuvieron una susceptibilidad muy alta (grado 5) en la subcuenca, fueron la clase media (RPI y MV) y clase alta (LMC y LC). En el caso de la clase muy alta, esta tiene una susceptibilidad baja (grado 2) en la mayoría de las geoformas, exceptuando a LC (grado 3) y LMC (grado 1) (Tabla 35).

**Tabla 35.** Susceptibilidad para la erosividad.

Erosividad CLSN	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy baja	1.768	0.003	0.191	0.5	5	0-0.1	1
Baja	0	0	0	0.125	2	0.1-0.2	2
Media	0	0	0	0.125	2	0.2-0.3	3
Alta	0	0	0	0.125	2	0.3-0.4	4
Muy alta	0	0	0	0.125	2	0.4-0.5	5
Erosividad CL	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy baja	2.625	0.022	0.820	0.5	5	0-0.1	1
Baja	2.039	0	0	0.125	2	0.1-0.2	2
Media	0	0	0	0.125	2	0.2-0.3	3
Alta	0	0	0	0.125	2	0.3-0.4	4
Muy alta	0	0	0	0.125	2	0.4-0.5	5
Erosividad RP	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy baja	0.621	0.003	0.491	0.385	5	0-0.078	1
Baja	2.652	0.009	0.352	0.346	5	0.078-0.156	2
Media	0	0	0	0.090	2	0.156-0.234	3
Alta	0	0	0	0.090	2	0.234-0.312	4
Muy alta	0	0	0	0.090	2	0.312-0.39	5
Erosividad RPI	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy baja	2.647	0.052	1.979	0.099	2	0-0.076	1
Baja	14.160	0.172	1.216	0.377	5	0.076-0.152	2
Media	8.977	0.090	1.006	0.336	5	0.152-0.228	3
Alta	0	0	0	0.094	2	0.228-0.304	4
Muy alta	0	0	0	0.094	2	0.304-0.38	5
Erosividad MV	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy baja	3.422	0	0	0.088	2	0-0.082	1
Baja	3.894	0.002	0.058	0.402	5	0.082-0.164	2
Media	0.736	0.0003	0.037	0.335	5	0.164-0.246	3
Alta	0	0	0	0.088	2	0.246-0.328	4
Muy alta	0	0	0	0.088	2	0.328-0.41	5

**Tabla 35 (Continuación).** Susceptibilidad para la erosividad.

Erosividad LB	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy baja	1.901	0	0	0.336	5	0-0.076	1
Baja	2.992	0.0013	0.0430	0.377	5	0.076-0.152	2
Media	0.005	0	0	0.099	2	0.152-0.228	3
Alta	0	0	0	0.094	2	0.228-0.304	4
Muy alta	0	0	0	0.094	2	0.304-0.38	5
Erosividad LMC	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy baja	0.105	0.001	1.334	0.075	2	0-0.072	1
Baja	5.989	0.044	0.730	0.313	5	0.072-0.144	2
Media	9.313	0.007	0.075	0.192	3	0.144-0.216	3
Alta	4.081	0.044	1.078	0.351	5	0.216-0.288	4
Muy alta	0	0	0	0.069	1	0.288-0.36	5
Erosividad LC	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy baja	0	0	0	0.047	1	0-0.068	1
Baja	3.823	0.075	1.969	0.296	5	0.068-0.136	2
Media	0.928	0.002	0.217	0.182	3	0.136-0.204	3
Alta	4.724	0.070	1.480	0.332	5	0.204-0.272	4
Muy alta	1.702	0.003	0.203	0.142	3	0.272-0.34	5

**CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

Si bien todas las geoformas están expuestas a un índice de Fournier modificado con rangos de erosividad muy alta (179-300) de acuerdo con Lobo et al., 2005, las susceptibilidades muy altas (grado 5) ocurren en las clases muy baja (179-203.2) y baja (203.2-227.4) para la mayoría de las geoformas; por lo que resulta más común encontrar estos valores de precipitación erosiva en toda la subcuenca, y es menos común la incidencia de lluvias erosivas con índice de Fournier modificado superior a 227.4.

### c) Clases de intensidad para áreas asociadas con la inestabilidad ladera por cambio de uso de suelo (2012)

Los pixeles de la variable cartográfica áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual muestran una escala de valores que va de 0 a 1, así que para comenzar con el análisis multicriterio, se reclasifico en cinco clases de intensidad: Muy baja (0-0.2), Baja (0.2-0.4), Media (0.4-0.6), Alta (0.6-0.8) y Muy alta (0.8-1). A partir de estas clases de intensidad se cuantifico el área de incidencia en cada una de ellas por geoformas y se procedió a asignar los valores en la matriz de jerarquización analítica de acuerdo a los criterios de Roa, 2007; considerando al área de

incidencia de las clases de intensidad y a la presencia de procesos de remoción en masa (1994-2012) con el fin de definir la contribución a la formación de nuevos procesos gravitacionales.

Así, en las CLSN solo se encontraron clase de intensidad muy alta (0.52 km<sup>2</sup>) y alta (0.0026 km<sup>2</sup>), por lo que en la matriz de jerarquización analítica la clase de intensidad muy alta tiene moderada preferencia sobre la clase alta, fuerte preferencia sobre la media y absoluta preferencia sobre la baja y muy baja. A pesar de que la clase de intensidad media no tuvo áreas cuantificadas en esta geoforma, si se consideró en las preferencias debido a su presencia en sitios cercanos a la clase muy alta en los bordes de la geoforma. En tanto que, para la clase de intensidad alta, se propuso una absoluta preferencia respecto a las clases mediana, baja y muy baja. Dado lo anterior, los pesos relativos son mayores en las clases muy alta (0.368) y alta (0.354), respecto al resto de las clases que son menores a 0.094 (Tabla 36).

Asimismo, en la CL solo se observó la presencia de las clases de intensidad muy alta (1.04 km<sup>2</sup>) y alta (0.042 km<sup>2</sup>). En este caso la clase muy alta tiene fuerte preferencia sobre la clase alta, y absoluta preferencia en el resto de las clases. Por su parte la clase alta tiene una absoluta preferencia sobre las demás. Sus pesos relativos fueron 0.402 en la clase muy alta, 0.335 para la clase alta y 0.088 para las otras de las clases (Tabla 36).

En la geoforma RP se observaron las clases de intensidad baja (0.0001 km<sup>2</sup>), media (0.015 km<sup>2</sup>), alta (0.073 km<sup>2</sup>) y muy alta (0.953 km<sup>2</sup>). La clase muy alta tuvo una fuerte preferencia sobre la clase alta y una absoluta preferencia en el resto de las clases. En tanto que la clase alta tuvo absoluta preferencia sobre las demás, estas a su vez tuvieron una igual preferencia entre ellas. Así, sus pesos relativos son 0.402 en la clase muy alta, 0.335 en la clase alta y 0.088 en las demás clases (Tabla 36).

La geoforma RPI muestra todas las clases de intensidad, sus áreas de incidencia siguen la jerarquía de muy baja (0.005 km<sup>2</sup>), baja (0.030 km<sup>2</sup>), media (0.209 km<sup>2</sup>), alta (0.791 km<sup>2</sup>) y muy alta (5.238 km<sup>2</sup>). Así, la clase muy alta tiene una moderada preferencia sobre la clase alta, fuerte preferencia sobre la clase media y absoluta preferencia sobre las clases baja y muy baja. En el caso de la clase alta, esta tiene una fuerte preferencia sobre la clase media y absoluta preferencia sobre las clases baja y muy baja. La clase media muestra una moderada preferencia sobre la clase baja y una absoluta preferencia sobre la muy baja. Por último, la clase baja tiene una igual preferencia sobre la clase muy baja. Los pesos relativos muestran valores altos en las clases muy alta (0.344), alta (0.307) y media (0.213), respecto a las clases baja (0.07) y muy baja (0.067) (Tabla 36).



En la MV se observan las clases baja (0.0028 km<sup>2</sup>), media (0.0143 km<sup>2</sup>), alta (0.047 km<sup>2</sup>) y muy alta (1.584 km<sup>2</sup>); dadas las diferencias entre las áreas de incidencia, la clase muy alta tiene una absoluta preferencia sobre todas de las demás clases presentes, Para el resto de las clases se estableció una igual preferencia entre ellas. Es por ello que los pesos relativos son 0.5 para la clase muy alta y 0.125 para todas las otras clases (Tabla 36).

Los LB muestran la presencia de las clases de intensidad baja (0.002 km<sup>2</sup>), media (0.006 km<sup>2</sup>), alta (0.059 km<sup>2</sup>) y muy alta (2.983 km<sup>2</sup>). La clase muy alta tuvo una fuerte preferencia sobre la clase alta y una absoluta preferencia sobre las demás. La clase alta se evaluó con fuerte preferencia sobre la clase media y absoluta preferencia sobre la baja y muy baja. La clase media sobre la baja se consideró con moderada preferencia y fuerte preferencia sobre la muy baja. Finalmente, la clase baja tuvo una igual preferencia sobre la muy baja. Los pesos relativos siguen el orden de las clases relativas: muy alta (0.393), alta (0.303), media (0.162), baja (0.074) y muy baja (0.070) (Tabla 36).

Para la LMC se ubicaron todas las clases de intensidad, siendo la clase muy alta la dominante (15.173 km<sup>2</sup>), le siguen la clase alta (1.228 km<sup>2</sup>), media (0.138 km<sup>2</sup>), baja (0.046 km<sup>2</sup>) y muy baja (0.006 km<sup>2</sup>). La clase muy alta se calificó con fuerte preferencia sobre la alta y absoluta preferencia en el resto de clases. La clase alta tuvo una fuerte preferencia sobre la media y una absoluta en las demás, en tanto que las preferencias en las otras clases de intensidad fueron iguales. El peso relativo fue mayor en las clases muy alta (0.411) y alta (0.317), en las clases media, baja y muy baja no supero el 0.092 (Tabla 36).

Por último, los LC también presentan las clases de intensidad muy alta (7.829 km<sup>2</sup>), alta (0.485 km<sup>2</sup>), media (0.057 km<sup>2</sup>), baja (0.022 km<sup>2</sup>) y muy baja (0.002 km<sup>2</sup>). La clase muy alta tiene moderada preferencia sobre la clase alta, fuerte preferencia sobre la media y absoluta preferencia sobre las clases baja y muy baja. En la clase alta se observó una fuerte preferencia sobre la media y absoluta preferencia sobre las clases baja y muy baja. Respecto a la clase media se evaluó moderada preferencia sobre la clase baja y absoluta preferencia sobre la muy baja, y en la clase baja se determinó una igual preferencia sobre la clase muy baja. Los pesos relativos muestran a las clases muy alta (0.351), alta (0.313) y media (0.192) como las más dominantes, en tanto que las clases baja (0.069) y muy baja (0.069) presentan una baja representatividad (Tabla 36).

**Tabla 36.** Matrices de jerarquización analítica para áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual.

Áreas asociadas CLSN	Muy alta (1)	Alta (0.80)	Media (0.60)	Baja (0.40)	Muy baja (0.20)	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n/\Sigma(\Sigma x_j/n)$ )
Muy alta (1)	1	2	3	4	4	2.8	0.368
Alta (0.80)	0.5	1	4	4	4	2.7	0.354
Media (0.60)	0.33	0.25	1	1	1	0.72	0.094
Baja (0.40)	0.25	0.25	1	1	1	0.7	0.092
Muy baja (0.20)	0.25	0.25	1	1	1	0.7	0.092
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	7.62
							1.000
Áreas asociadas CL	Muy alta (1)	Alta (0.80)	Media (0.60)	Baja (0.40)	Muy baja (0.20)	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n/\Sigma(\Sigma x_j/n)$ )
Muy alta (1)	1	3	4	4	4	3.2	0.402
Alta (0.80)	0.33	1	4	4	4	2.67	0.335
Media (0.60)	0.25	0.25	1	1	1	0.7	0.088
Baja (0.40)	0.25	0.25	1	1	1	0.7	0.088
Muy baja (0.20)	0.25	0.25	1	1	1	0.7	0.088
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	7.97
							1.000
Áreas asociadas RP	Muy alta (1)	Alta (0.80)	Media (0.60)	Baja (0.40)	Muy baja (0.20)	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n/\Sigma(\Sigma x_j/n)$ )
Muy alta (1)	1	3	4	4	4	3.2	0.402
Alta (0.80)	0.33	1	4	4	4	2.67	0.335
Media (0.60)	0.25	0.25	1	1	1	0.7	0.088
Baja (0.40)	0.25	0.25	1	1	1	0.7	0.088
Muy baja (0.20)	0.25	0.25	1	1	1	0.7	0.088
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	7.97
							1.000
Áreas asociadas RPI	Muy alta (1)	Alta (0.80)	Media (0.60)	Baja (0.40)	Muy baja (0.20)	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n/\Sigma(\Sigma x_j/n)$ )
Muy alta (1)	1	2	3	4	4	2.80	0.344
Alta (0.80)	0.50	1	3	4	4	2.50	0.307
Media (0.60)	0.33	0.33	1	3	4	1.73	0.213
Baja (0.40)	0.25	0.25	0.33	1	1	0.57	0.070
Muy baja (0.20)	0.25	0.25	0.25	1	1	0.55	0.067
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	8.15
							1.000
Áreas asociadas MV	Muy alta (1)	Alta (0.80)	Media (0.60)	Baja (0.40)	Muy baja (0.20)	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n/\Sigma(\Sigma x_j/n)$ )
Muy alta (1)	1	4	4	4	4	3.4	0.500
Alta (0.80)	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
Media (0.60)	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
Baja (0.40)	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
Muy baja (0.20)	0.25	1	1	1	1	0.85	0.125
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	6.8
							1.000
Áreas asociadas LB	Muy alta (1)	Alta (0.80)	Media (0.60)	Baja (0.40)	Muy baja (0.20)	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n/\Sigma(\Sigma x_j/n)$ )
Muy alta (1)	1	3	4	4	4	3.20	0.393
Alta (0.80)	0.33	1	3	4	4	2.47	0.303
Media (0.60)	0.25	0.33	1	2	3	1.32	0.162
Baja (0.40)	0.25	0.25	0.5	1	1	0.60	0.074
Muy baja (0.20)	0.25	0.25	0.33	1	1	0.57	0.070
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	8.15
							1.000

**Tabla 36 (continuación).** Matrices de jerarquización analítica para áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual.

Áreas asociadas LMC	Muy alta (1)	Alta (0.80)	Media (0.60)	Baja (0.40)	Muy baja (0.20)	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n/\Sigma(\Sigma x_j/n)$ )
Muy alta (1)	1	3	4	4	4	3.20	0.411
Alta (0.80)	0.33	1	3	4	4	2.47	0.317
Media (0.60)	0.25	0.33	1	1	1	0.72	0.092
Baja (0.40)	0.25	0.25	1	1	1	0.70	0.090
Muy baja (0.20)	0.25	0.25	1	1	1	0.70	0.090
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	1.000
Áreas asociadas LC	Muy alta (1)	Alta (0.80)	Media (0.60)	Baja (0.40)	Muy baja (0.20)	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n/\Sigma(\Sigma x_j/n)$ )
Muy alta (1)	1	2	3	4	4	2.80	0.351
Alta (0.80)	0.5	1	3	4	4	2.50	0.313
Media (0.60)	0.33	0.33	1	2	4	1.53	0.192
Baja (0.40)	0.25	0.25	0.5	1	1	0.60	0.075
Muy baja (0.20)	0.25	0.25	0.25	1	1	0.55	0.069
						$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	1.000

**CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

Con base en los pesos relativos, se procedió a obtener el grado de susceptibilidad considerando la superficie que cubren las áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual y el área removida por los procesos gravitacionales en cada una de las geoformas. Estas superficies se compararon con los pesos relativos en cada clase de intensidad y con ello se determinó el grado de susceptibilidad de cada clase de intensidad del 1 al 5, siendo 1 susceptibilidad muy baja y 5 susceptibilidad muy alta a procesos gravitacionales.

Las geoformas CLSN, CL y RP mostraron un grado de susceptibilidad en grado 5 para las clases muy alta y alta, y un grado de susceptibilidad 2 en el resto de las clases. En la geoforma RPI, la susceptibilidad más alta se observó en las clases muy alta y alta (grado 5), le siguen la clase media (grado 4) y las clases baja y muy baja con menor susceptibilidad (grado 1). La MV solo tiene en la clase muy alta un grado 5 de susceptibilidad y en el resto de las clases un grado 2. Los LB evidencian una susceptibilidad mayor en la clase muy alta (grado 5), le continúa la clase alta (grado 4), la clase media (grado 3) y las clases baja y muy baja (grado 1). En la LMC la clase muy alta tiene grado 5 de susceptibilidad, la clase media grado 4 y las demás clases grado 2. Por último, los LC registraron en las clases muy alta y alta una susceptibilidad grado 5, en la clase media una susceptibilidad grado 3, en la clase baja una susceptibilidad grado 2 y en la clase muy baja una susceptibilidad grado 1 (Tabla 37).

**Tabla 37.** Susceptibilidad para las áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual.

Áreas asociadas CLSN	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy alta (1)	0.516	0.003	0.654	0.368	5	0-0.076	1
Alta (0.80)	0.003	0	0	0.354	5	0.076-0.152	2
Media (0.60)	0	0	0	0.094	2	0.152-0.228	3
Baja (0.40)	0	0	0	0.092	2	0.228-0.304	4
Muy baja (0.20)	0	0	0	0.092	2	0.304-0.38	5
Áreas asociadas CL	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy alta (1)	1.038	0.022	2.075	0.402	5	0-0.082	1
Alta (0.80)	0.042	0	0	0.335	5	0.082-0.164	2
Media (0.60)	0	0	0	0.088	2	0.164-0.246	3
Baja (0.40)	0	0	0	0.088	2	0.246-0.328	4
Muy baja (0.20)	0	0	0	0.088	2	0.328-0.41	5
Áreas asociadas RP	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy alta (1)	0.953	0.012	1.301	0.402	5	0-0.082	1
Alta (0.80)	0.073	0	0	0.335	5	0.082-0.164	2
Media (0.60)	0.015	0	0	0.088	2	0.164-0.246	3
Baja (0.40)	0.001	0	0	0.088	2	0.246-0.328	4
Muy baja (0.20)	0	0	0	0.088	2	0.328-0.41	5
Áreas asociadas RPI	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy alta (1)	5.238	0.043	0.819	0.344	5	0-0.07	1
Alta (0.80)	0.791	0.030	3.774	0.307	5	0.07-0.14	2
Media (0.60)	0.209	0.006	2.775	0.213	4	0.14-0.21	3
Baja (0.40)	0.030	0.030	100	0.070	1	0.21-0.28	4
Muy baja (0.20)	0.005	0.005	100	0.067	1	0.28-0.35	5
Áreas asociadas MV	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy alta (1)	1.584	0.003	0.159	0.500	5	0-0.1	1
Alta (0.80)	0.047	0	0	0.125	2	0.1-0.2	2
Media (0.60)	0.014	0	0	0.125	2	0.2-0.3	3
Baja (0.40)	0.003	0	0	0.125	2	0.3-0.4	4
Muy baja (0.20)	0	0	0	0.125	2	0.4-0.5	5
Áreas asociadas LB	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy alta (1)	2.983	0.0013	0.0432	0.393	5	0-0.08	1
Alta (0.80)	0.059	0	0	0.303	4	0.08-0.16	2
Media (0.60)	0.006	0	0	0.162	3	0.16-0.24	3
Baja (0.40)	0.002	0	0	0.074	1	0.24-0.32	4
Muy baja (0.20)	0	0	0	0.070	1	0.32-0.4	5

**Tabla 37 (Continuación).** Susceptibilidad para las áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual.

Áreas asociadas LMC	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy alta (1)	15.173	0.074	0.490	0.411	5	0-0.084	1
Alta (0.80)	1.228	0.022	1.765	0.317	4	0.084-0.168	2
Media (0.60)	0.138	0	0	0.092	2	0.168-0.252	3
Baja (0.40)	0.046	0	0	0.090	2	0.252-0.336	4
Muy baja (0.20)	0.006	0	0	0.090	2	0.336-0.42	5
Áreas asociadas LC	Superficie de la variable	Superficie PG	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
Muy alta (1)	7.829	0.142	1.818	0.351	5	0-0.072	1
Alta (0.80)	0.485	0.008	1.724	0.313	5	0.072-0.144	2
Media (0.60)	0.057	0	0	0.192	3	0.144-0.216	3
Baja (0.40)	0.022	0	0	0.075	2	0.216-0.288	4
Muy baja (0.20)	0.002	0	0	0.069	1	0.288-0.36	5

**CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

En resumen, los resultados muestran que las clases de intensidad dominantes en las áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual, son las clases muy alta y alta, las cuales obtuvieron un peso relativo mayor y al compararlas con las superficies removidas por procesos gravitacionales, coinciden con los grados de susceptibilidad más altos. En prácticamente el resto de las clases de intensidad para cada geoforma se observaron grados de susceptibilidad menores a grado 3, excepto en la RPI donde la clase media obtuvo un grado de susceptibilidad 4.

### 3.3.2 Susceptibilidad a inestabilidad de ladera en variables cartográficas

En este análisis se muestra una matriz de jerarquización analítica y una evaluación de la susceptibilidad para cada variable cartográfica en cada geoforma; con la finalidad de obtener pesos ponderados (peso relativo) para la suma ponderada de variables cartográficas por geoforma (Cambio de cobertura vegetal, procesos gravitacionales, erosividad por lluvias y áreas asociadas con la inestabilidad ladera por cambio de uso de suelo actual). Lo anterior, permitió establecer las zonas susceptibles a inestabilidad de laderas por cambio de uso de suelo.

En el cambio de uso de suelo entre 2003-2012 se sumaron las superficies con degradación y recuperación ya que fueron las clases que intensidad que presentaron procesos gravitacionales, de acuerdo al resultado las geoformas siguen el orden en función de la superficie con cambios: LMC

(16.401 km<sup>2</sup>), RPI (4.801 km<sup>2</sup>), LC (2.755 km<sup>2</sup>), LB (1.388 km<sup>2</sup>), MV (1.193 km<sup>2</sup>), CL (1.151 km<sup>2</sup>), RP (0.758 km<sup>2</sup>) y CLSN (0.459 km<sup>2</sup>). La LMC obtuvo una fuerte preferencia sobre RPI y absoluta preferencia sobre las demás geoformas; la RPI mostro una fuerte preferencia sobre los LC y absoluta preferencia sobre las geoformas restantes; los LC indicaron una moderada preferencia sobre los LB, fuerte preferencia sobre la MV y la CL, y absoluta preferencia en las otras clases; los LB tuvieron una moderada preferencia sobre la MV y CL, una fuerte preferencia sobre la RP y absoluta preferencia sobre las CLSN; la MV tuvo una moderada preferencia sobre la CL, fuerte preferencia sobre la RP (16,500 años A.P.) y absoluta preferencia sobre las CLSN; la CL tiene una fuerte preferencia sobre la RP y absoluta preferencia sobre las CLSN; y finalmente, la RP indico una moderada preferencia sobre las CLSN. Los pesos relativos son 0.250 para la LMC, 0.218 para la RPI, 0.157 para los LC, 0.116 para los LB, 0.101 para la MV, 0.088 para la CL, 0.042 para la RP y 0.027 para las CLSN (Tabla 38).

En el caso de los procesos gravitacionales, se sumó la superficie de todos tipos de procesos gravitacionales por geoforma y el orden por geoforma es: RPI (0.387 km<sup>2</sup>), LC (0.192 km<sup>2</sup>), LMC (0.101 km<sup>2</sup>), CL (0.022 km<sup>2</sup>), RP (0.019 km<sup>2</sup>), MV (0.010 km<sup>2</sup>), LB (0.004 km<sup>2</sup>) y CLSN (0.003 km<sup>2</sup>). La RPI tuvo fuerte preferencia sobre los LC y absoluta preferencia sobre el resto de las geoformas; los LC obtuvieron una moderada preferencia sobre la LMC, una fuerte preferencia sobre la CL y una absoluta preferencia sobre las demás geoformas; la LMC indico una fuerte preferencia sobre CL y absoluta preferencia en las otras geoformas; la CL mostro una moderada preferencia sobre la RP, una fuerte preferencia sobre la MV y absoluta preferencia sobre el resto de las clases; en la RP se observó una fuerte preferencia sobre la MV y absoluta preferencia sobre los LB y CLSN; la mesa volcánica manifestó una moderada preferencia sobre los LB y absoluta preferencia sobre las CLSN; en último lugar están los LB que tuvieron una moderada preferencia sobre las CLSN. Los pesos relativos son 0.241 para la RPI, 0.192 para los LRC, 0.178 para la LMC, 0.128 para la CL, 0.114 para la RP, 0.081 para la MV, 0.039 para los LB y 0.026 para las CLSN (Tabla 38).

En la erosividad también se sumaron todos los rangos de erosividad por geoforma y el orden de acuerdo a su superficie es: RPI (25.784 km<sup>2</sup>), LMC (19.488 km<sup>2</sup>), LC (11.177 km<sup>2</sup>), MV (8.053 km<sup>2</sup>), LB (4.898 km<sup>2</sup>), CL (4.664 km<sup>2</sup>), RP (3.273 km<sup>2</sup>), y CLSN (1.768 km<sup>2</sup>). La RPI mostro una moderada preferencia sobre la LMC, fuerte preferencia sobre los LC y MV, y absoluta preferencia sobre las demás geoformas; la LMC tuvo una fuerte preferencia sobre los LC y MV y absoluta preferencia sobre las otras geoformas. Los LC obtuvieron una moderada preferencia sobre la MV,

fuerte preferencia sobre los LB y la CL, y absoluta preferencia sobre las geoformas restantes. La MV indico una fuerte preferencia sobre los LB y la CL, y una absoluta preferencia sobre las clases remanentes. Los LB presentan una moderada preferencia sobre la CL, fuerte preferencia sobre la RP y absoluta preferencia sobre las CLSN; la CL tuvo una fuerte preferencia sobre la RP y absoluta preferencia sobre las CLSN. Por último, la RP mostro una fuerte referencia sobre las CLSN. Los pesos relativos son 0.224 para RPI, 0.201 para LMC, 0.158 para LC, 0.145 para MV, 0.1 LB, 0.087 para CL, 0.051 para RP y 0.025 en las CLSN (Tabla 38).

Finalmente, las áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual, el orden para las geoformas con más superficie de áreas asociadas es: LMC (16.591km<sup>2</sup>), LC (8.394 km<sup>2</sup>), RPI (6.272 km<sup>2</sup>), LB (3.051 km<sup>2</sup>), MV (1.648 km<sup>2</sup>), CL (1.080 km<sup>2</sup>), RP (1.041 km<sup>2</sup>) y CLSN (0.519 km<sup>2</sup>). La LMC tuvo una fuerte preferencia sobre los LC y RPI, y una absoluta preferencia sobre las demás geoformas; los LC mostraron una moderada preferencia sobre la RPI, una fuerte preferencia sobre los LB, y una absoluta preferencia sobre las otras geoformas, en la RPI se observó una fuerte preferencia sobre los LB y una absoluta preferencia sobre el resto de las clases; los LB por su parte indicaron una moderada preferencia sobre la MV, una fuerte preferencia sobre la CL, y una absoluta preferencia sobre la RP y las CLSN; en la MV se evidencio una moderada preferencia sobre la CL, y una fuerte preferencia en las geoformas restantes; en la CL se tuvo una moderada preferencia sobre la RP y una absoluta preferencia sobre las CLSN; por último, la RP obtuvo una fuerte preferencia sobre las CLSN. Los pesos relativos fueron 0.242 para la LMC, 0.2 para los LC, 0.186 para la RPI, 0.133 los LB, 0.092 para la MV, 0.068 para la CL, 0.052 para la RP y 0.027 para CLSN (Tabla 38).

**Tabla 38.** Matrices de jerarquización analítica para variables cartográficas.

Áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo	LMC	LC	RPI	LB	MV	CL	RP	CLSN	$\Sigma x_j/n$	Peso relativo ( $\Sigma x_j/n/\Sigma(\Sigma x_j/n)$ )
LMC	1	3	3	4	4	4	4	4	27.00	0.242
LC	0.33	1	2	3	4	4	4	4	22.33	0.200
RPI	0.33	0.50	1	3	4	4	4	4	20.83	0.186
LB	0.25	0.33	0.33	1	2	3	4	4	14.92	0.133
MV	0.25	0.25	0.25	0.50	1	2	3	3	10.25	0.092
CL	0.25	0.25	0.25	0.33	0.50	1	2	3	7.58	0.068
RP	0.25	0.25	0.25	0.25	0.33	0.50	1	3	5.83	0.052
CLSN	0.25	0.25	0.25	0.25	0.33	0.33	0.33	1	3.00	0.027
								$\Sigma(\Sigma x_j/n)$	111.75	1.000

**Tabla 38 (continuación).** Matrices de jerarquización analítica para variables cartográficas.

Cambio de uso de suelo 2003-2012	LMC	RPI	LC	LB	MV	CL	RP	CLSN	$\Sigma_{xj}/n$	Peso relativo ( $\Sigma_{xj}/n)/\Sigma(\Sigma_{xj}/n)$	
LMC	1	3	4	4	4	4	4	4	28.00	0.250	
RPI	0.33	1	3	4	4	4	4	4	24.33	0.218	
LC	0.25	0.33	1	2	3	3	4	4	17.58	0.157	
LB	0.25	0.25	0.50	1	2	2	3	4	13.00	0.116	
MV	0.25	0.25	0.33	0.50	1	2	3	4	11.33	0.101	
CL	0.25	0.25	0.33	0.50	0.50	1	3	4	9.83	0.088	
RP	0.25	0.25	0.25	0.33	0.33	0.33	1	2	4.75	0.042	
CLSN	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.50	1	3.00	0.027	
									$\Sigma(\Sigma_{xj}/n)$	111.83	1.000

Procesos gravitacionales	RPI	LC	LMC	CL	RP	MV	LB	CLSN	$\Sigma_{xj}/n$	Peso relativo ( $\Sigma_{xj}/n)/\Sigma(\Sigma_{xj}/n)$	
RPI	1	3	4	4	4	4	4	4	28.00	0.241	
LC	0.33	1	2	3	4	4	4	4	22.33	0.192	
LMC	0.25	0.50	1	3	4	4	4	4	20.75	0.178	
CL	0.25	0.33	0.33	1	2	3	4	4	14.92	0.128	
RP	0.25	0.25	0.25	0.50	1	3	4	4	13.25	0.114	
MV	0.25	0.25	0.25	0.33	0.33	1	3	4	9.42	0.081	
LB	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.33	1	2	4.58	0.039	
CLSN	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.50	1	3.00	0.026	
									$\Sigma(\Sigma_{xj}/n)$	116.25	1.000

Erosividad	RPI	LMC	LC	MV	LB	CL	RP	CLSN	$\Sigma_{xj}/n$	Peso relativo ( $\Sigma_{xj}/n)/\Sigma(\Sigma_{xj}/n)$	
RPI	1	2	3	3	4	4	4	4	25.00	0.224	
LMC	0.50	1	3	3	4	4	4	4	23.50	0.210	
CL	0.33	0.33	1	2	3	3	4	4	17.67	0.158	
MV	0.33	0.33	0.50	1	3	3	4	4	16.17	0.145	
LB	0.25	0.25	0.33	0.33	1	2	3	4	11.17	0.100	
LH	0.25	0.25	0.33	0.33	0.50	1	3	4	9.67	0.087	
RP	0.25	0.25	0.25	0.25	0.33	0.33	1	3	5.67	0.051	
CLSN	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.33	1	2.83	0.025	
									$\Sigma(\Sigma_{xj}/n)$	111.67	1.000

**CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

Para obtener el grado de susceptibilidad para cada variable cartográfica por geoforma, se consideró la superficie que cubre cada una de las geoformas y la superficie de todas las geoformas de acuerdo a la variable cartográfica de evaluación. Así, en la RPI la susceptibilidad muy alta (grado 5) se observó en cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012, en procesos gravitacionales y erosividad; la geoforma de LMC tiene una susceptibilidad muy alta (grado 5) en áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo actual, en cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012 y erosividad; la geoforma de LC obtuvo una susceptibilidad alta (grado 4) en todas las variables cartográficas; la MV tuvo una susceptibilidad alta (grado 4) en la erosividad, susceptibilidad media (grado 3) en



cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012, y susceptibilidad baja (grado 2) en áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo y procesos gravitacionales; los LB muestran una susceptibilidad media (grado 3) en áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo, en cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012 y erosividad, y una susceptibilidad muy baja (grado 1) en procesos gravitacionales; por su parte la RP indico una susceptibilidad media (grado 3) en procesos gravitacionales, y una susceptibilidad baja (grado 2) en el resto de las variables cartográficas; asimismo la CL tuvo una susceptibilidad media (grado 3) y una susceptibilidad baja (grado 2) en las demás variables cartográficas; y finalmente, en la geoforma de CLSN se observó una susceptibilidad muy baja en todas las variables cartográficas (Tabla 39).

**Tabla 39.** Susceptibilidad para variables cartográficas.

Áreas asociadas a inestabilidad de ladera por uso de suelo.	Superficie geoforma	Superficie variable	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
CLSN	1.77	0.52	29.27	0.03	1	0-0.05	1
CL	4.67	1.08	23.13	0.07	2	0.05-0.10	2
RP	3.27	1.04	31.81	0.05	2	0.10 - 0.15	3
RPI	25.80	6.27	24.31	0.19	4	0.15 - 0.20	4
MV	8.06	1.65	20.45	0.09	2	0.20- 0.25	5
LB	4.90	3.05	62.26	0.13	3		
LMC	19.50	16.59	85.09	0.24	5		
LC	11.18	8.39	75.06	0.20	4		
Cambio de uso de suelo 2003-2012	Superficie geoforma	Superficie variable	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
CLSN	1.77	0.46	25.91	0.03	1	0-0.052	1
CL	4.67	1.15	24.65	0.09	2	0.052-0.104	2
RP	3.27	0.76	23.16	0.04	1	0.104 - 0.156	3
RPI	25.80	4.80	18.61	0.22	5	0.156 - 0.208	4
MV	8.06	1.19	14.80	0.10	3	0.208- 0.26	5
LB	4.90	1.39	28.33	0.12	3		
LMC	19.50	16.40	84.11	0.25	5		
LC	11.18	2.76	24.64	0.16	4		
Procesos gravitacionales	Superficie geoforma	Superficie variable	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
CLSN	1.77	0.00	0.19	0.03	1	0-0.05	1
CL	4.67	0.02	0.46	0.13	3	0.05-0.10	2
RP	3.27	0.02	0.57	0.11	3	0.10 - 0.15	3
RPI	25.80	0.39	1.50	0.24	5	0.15 - 0.20	4
MV	8.06	0.01	0.12	0.08	2	0.20- 0.25	5
LB	4.90	0.00	0.07	0.04	1		
LMC	19.50	0.10	0.52	0.18	4		
LC	11.18	0.19	1.72	0.19	4		

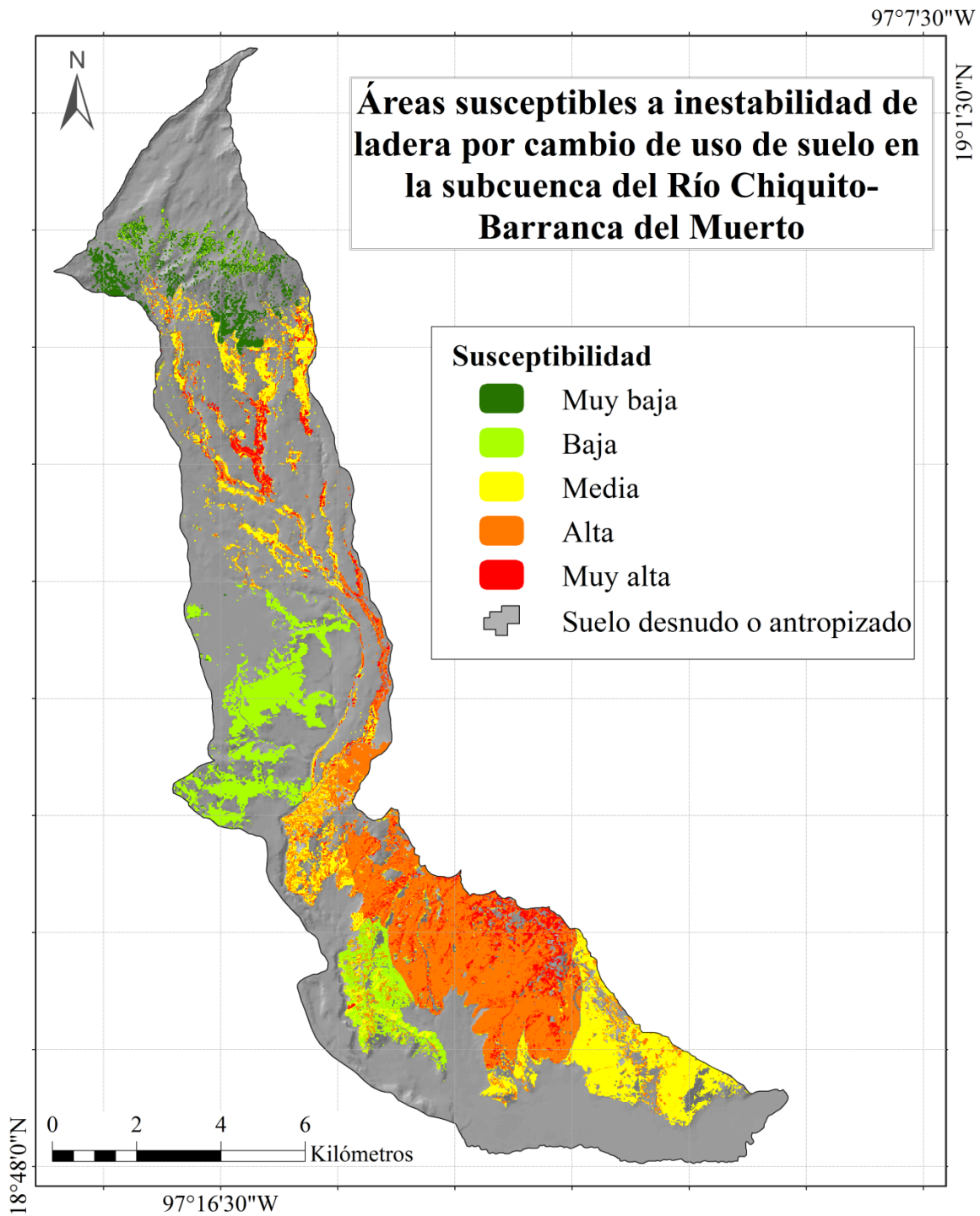
**Tabla 39 (Continuación).** Susceptibilidad para variables cartográficas.

Erosividad	Superficie geoforma	Superficie variable	Peso Unidad %	Ponderación de la variable	Grado de susceptibilidad	Rango susceptibilidad	Grado
CLSN	1.77	1.77	99.71	0.03	1	0-0.046	1
CL	4.67	4.66	99.86	0.09	2	0.046-0.092	2
RP	3.27	3.27	99.98	0.05	2	0.092 - 0.138	3
RPI	25.80	25.78	99.92	0.22	5	0.138 - 0.184	4
MV	8.06	8.05	99.88	0.14	4	0.184- 0.23	5
LB	4.90	4.90	99.97	0.10	3		
LMC	19.50	19.49	99.94	0.21	5		
LC	11.18	11.18	99.94	0.16	4		

**CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

Considerando las variables cartográficas por geoforma, se evidencia que la susceptibilidad a procesos gravitacionales coincide para tres geoformas con la incidencia de eventos ocurridos entre 1994 y 2012 por geoforma. En el caso de la RPI tuvo una susceptibilidad muy alta en la mayoría de las variables cartográficas (incluyendo al mapa procesos gravitacionales), lo cual se refleja en la incidencia de 257 procesos gravitacionales. La geoforma de LMC mostro una susceptibilidad muy alta en casi todas las variables cartográficas y a pesar de tener una susceptibilidad alta en procesos gravitacionales, si hay una considerable incidencia de procesos gravitacionales entre 1994 y 2012 (109 eventos). Los LC que tuvieron una alta susceptibilidad en todas las variables cartográficas, también tuvieron una notable incidencia de procesos gravitacionales entre 1994 y 2012 con 82 eventos.

Con la susceptibilidad a procesos gravitacionales en las clases de intensidad se reclasificaron cada una de las variables cartográficas por geoforma. Posteriormente con los pesos ponderados de las variables cartográficas por geoformas, se procedió a realizar una suma lineal ponderada para obtener el mapa de áreas susceptibles a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo (Fig. 63).



**Figura 63.** Susceptibilidad en la subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto.

En el mapa se observa que las áreas con susceptibilidad alta y muy alta a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo se ubican en las geformas de RPI y LMC. La susceptibilidad media se

presenta en la RPI, LMC y LC. La susceptibilidad baja está presente en las geoformas de MV, LB y LC. Y la susceptibilidad muy baja se observó en las CLSN y CL. Estos resultados coinciden por un lado con el inventario de procesos gravitacionales, que expone que las geoformas más afectadas por estos eventos son la RPI, la LMC y los LC; y con el cambio de uso de suelo entre 2003 y 2012, como se observa en la geoforma RPI que presenta una distribución de la vegetación natural solo en los cauces, lo cual se deriva de las actividades agrícolas. En el caso de las geoformas de CLSN, CL y RP, estas muestran una susceptibilidad muy baja a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo debido a que se encuentran dentro del polígono del Parque Nacional Pico de Orizaba; lo cual indica que el cambio de uso de suelo no es el responsable de la existencia de procesos gravitacionales en su interior y estos ocurren debido a las características geológicas, edafológicas y de vegetación principalmente. En el resto de las geoformas (MV y LB) hay que mencionar que a pesar del considerable uso de suelo al que se exponen (valores altos en ramoneo de árboles), los procesos gravitacionales no son frecuentes, lo cual puede corresponder a los materiales geológicos (ignimbritas y basaltos), a la estructura edáfica (estabilidad de agregados media y textura de suelo con bajos porcentajes de arena) y la protección de la vegetación natural (valores altos en abundancia y talla de arbórea).

### 3.4 Evaluación de la confiabilidad de los mapas

Los resultados del cálculo de puntos de muestreo para validación por clase de susceptibilidad indican una mayor cobertura de puntos de validación para las clases media (108 puntos) y alta (153 puntos). Lo anterior se debe a que son las clases con mayor superficie. A estas clases de susceptibilidad le siguen la clase baja (74 puntos), muy alta (41 puntos) y muy baja (24 puntos). En todos los casos el número de puntos de validación garantiza una verificación del área casi completa (0.998-1.009), tal como lo muestra la relación de puntos de validación por área validada (Tabla 40).

**Tabla 40.** Puntos de muestreo para validación por clase de susceptibilidad.

Clases de susceptibilidad	Superficie	Superficie (%)	Proporción de puntos de validación	Puntos de validación	Proporción de área validada (%)	Relación de puntos de validación por área validada.
Muy baja	2.317	6.013	24.051	24	6.000	0.998
Baja	7.158	18.574	74.297	74	18.500	0.996
Media	10.371	26.909	107.636	108	27.000	1.003
Alta	14.778	38.345	153.381	153	38.250	0.998
Muy alta	3.915	10.159	40.635	41	10.250	1.009
Total	38.540	100	400	400	100	

Con los puntos de verificación definidos por clase de susceptibilidad, se procedió a calcular los puntos de verificación de cada clase de susceptibilidad por geoforma. Para la clase de susceptibilidad muy baja, las geoformas con mayor área y por ende con mayor proporción de puntos de verificación son RP (11 puntos), CL (7 puntos), CLSN (5 puntos) y MV (1 punto). Estas geoformas tienen una buena cobertura de verificación, incluso se dio una sobre representación en la MV (0.932 - 3.708). Las geoformas LB y RPI, también tienen superficies de incidencia con clase muy baja, sin embargo, son áreas pequeñas (0.002-0.014 km<sup>2</sup>) y por tanto no se consideran para otorgarles puntos de verificación, ya que quedarían sobrerrepresentadas (Tabla 41).

En la clase de susceptibilidad baja, las geoformas con más puntos de verificación son LB (31 puntos), LC (21 puntos), MV (16 puntos), CL (4 puntos), RPI (1 punto) y LMC (1 punto). La cobertura de verificación muestra valores de 0.976 a 1.536. En esta clase también se ubican áreas con susceptibilidad baja en las geoformas RP (0.003 km<sup>2</sup>) pero dada su poca representatividad, no se le asignaron puntos de verificación (Tabla 40).

En la susceptibilidad media, destacan las geoformas LC (55 puntos), RPI (37 puntos) y LMC (16 puntos). La cobertura de verificación fue de 0.989 a 1.011. Las geoformas MV (0.033 km<sup>2</sup>), LB (0.003 km<sup>2</sup>) y RP (0.001 km<sup>2</sup>) tuvieron pocas áreas con susceptibilidad media y es por ello que no se hizo una verificación en ellas (Tabla 41).

La susceptibilidad alta mostro incidencia en las geoformas LMC (130 puntos), RPI (12 puntos) y LC (11 puntos). La cobertura de verificación va de 0.996 a 1.045. En este caso solo en la RP se presentó un área pequeña (0.001 km<sup>2</sup>) que no obtuvo puntos de verificación (Tabla 41).

Finalmente, en la clase de susceptibilidad muy alta solo destacaron las geoformas LMC (25 puntos) y RPI (16 puntos); con una cobertura de verificación de 0.995 a 1.015. Aquí solo los LC (0.026 km<sup>2</sup>) no tuvieron puntos de verificación (Tabla 41).

**Tabla 41.** Puntos de muestreo para validación de susceptibilidad por geoforma.

Geoforma	Clases de susceptibilidad	Superficie	Superficie (%)	Proporción de puntos de validación	Puntos de validación	Proporción de área validada (%)	Relación de puntos de validación por área validada.
CLSN	Muy baja	0.517	22.314	5.355	5	20.833	0.934
CL	Muy baja	0.725	31.288	7.509	7	29.167	0.932
RP	Muy baja	1.033	44.599	10.704	11	45.833	1.028
RPI	Muy baja	0.002	0.065	0.016	0	0.000	0.000
MV	Muy baja	0.026	1.124	0.270	1	4.167	3.708
LB	Muy baja	0.014	0.600	0.144	0	0.000	0.000
LMC	Muy baja	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0.000
LC	Muy baja	0.000	0.009	0.002	0	0.000	0.000
<b>Total</b>		2.32	100	24	24	100	
Geoforma	Clases de susceptibilidad	Superficie	Superficie (%)	Proporción de puntos de validación	Puntos de validación	Proporción de área validada (%)	Relación de puntos de validación por área validada.
CLSN	Baja	0.000	0.002	0.002	0	0.000	0.000
CL	Baja	0.353	4.937	3.653	4	5.405	1.095
RP	Baja	0.003	0.038	0.028	0	0.000	0.000
RPI	Baja	0.065	0.913	0.676	1	1.351	1.480
MV	Baja	1.584	22.152	16.393	16	21.622	0.976
LB	Baja	3.024	42.309	31.308	31	41.892	0.990
LMC	Baja	0.063	0.880	0.651	1	1.351	1.536
LC	Baja	2.057	28.768	21.289	21	28.378	0.986
<b>Total</b>		7.15	100	74	74	100	
Geoforma	Clases de susceptibilidad	Superficie	Superficie (%)	Proporción de puntos de validación	Puntos de validación	Proporción de área validada (%)	Relación de puntos de validación por área validada.
CLSN	Media	0.000	0.001	0.001	0	0.000	0.000
CL	Media	0.000	0.003	0.003	0	0.000	0.000
RP	Media	0.001	0.013	0.014	0	0.000	0.000
RPI	Media	3.549	34.277	37.019	37	34.259	0.999
MV	Media	0.033	0.323	0.349	0	0.000	0.000
LB	Media	0.003	0.025	0.027	0	0.000	0.000
LMC	Media	1.551	14.980	16.178	16	14.815	0.989
LC	Media	5.216	50.379	54.409	55	50.926	1.011
<b>Total</b>		10.35	100	108	108	100	
Geoforma	Clases de susceptibilidad	Superficie	Superficie (%)	Proporción de puntos de validación	Puntos de validación	Proporción de área validada (%)	Relación de puntos de validación por área validada.
CLSN	Alta	0.000	0.000	0.001	0	0.000	0.000
CL	Alta	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0.000
RP	Alta	0.001	0.004	0.006	0	0.000	0.000
RPI	Alta	1.109	7.506	11.485	12	7.843	1.045
MV	Alta	0.000	0.003	0.005	0	0.000	0.000
LB	Alta	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0.000
LMC	Alta	12.597	85.270	130.464	130	84.967	0.996
LC	Alta	1.066	7.216	11.040	11	7.190	0.996
<b>Total</b>		14.77	100	153	153	100	

**Tabla 41 (Continuación).** Puntos de muestreo para validación de susceptibilidad por geoforma.

Geoforma	Clases de susceptibilidad	Superficie	Superficie (%)	Proporción de puntos de validación	Puntos de validación	Proporción de área validada (%)	Relación de puntos de validación por área validada.
<b>CLSN</b>	Muy alta	0.000	0.001	0.001	0	0.000	0.000
<b>CL</b>	Muy alta	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0.000
<b>RP</b>	Muy alta	0.000	0.003	0.001	0	0.000	0.000
<b>RPI</b>	Muy alta	1.535	39.225	16.082	16	39.024	0.995
<b>MV</b>	Muy alta	0.000	0.009	0.004	0	0.000	0.000
<b>LB</b>	Muy alta	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0.000
<b>LMC</b>	Muy alta	2.352	60.099	24.640	25	60.976	1.015
<b>LC</b>	Muy alta	0.026	0.664	0.272	0	0.000	0.000
<b>Total</b>		3.91	100	41	41	100	

**CLSN.** Coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka). **CL.** Colada de lava (16,500 años A.P.). **RP.** Rampa piroclástica (16,500 años A.P.). **RPI.** Rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.). **MV.** Mesa volcánica (1860-1910 años A.P.). **LB.** Lomeríos basálticos (Plioceno-Pleistoceno). **LMC.** Ladera de montaña de calizas (Cretácico). **LC.** Lomeríos de calizas (Mioceno-Plioceno).

Los resultados del análisis de verificación se muestran en la matriz de error, en el caso de los píxeles de una clase que no fueron ubicados en ella, la clase de susceptibilidad alta fue la que tuvo menor error de omisión (0.059) y por ende la mayor confiabilidad (0.941), le siguen la clase media (error de omisión 0.120 y confiabilidad de productor 0.880) y clase baja (error de omisión 0.162 y confiabilidad de productor 0.838). Las clases con más errores de omisión fueron muy altas (error de omisión 0.244 y confiabilidad de productor 0.756) y muy baja (error de omisión 0.250 y confiabilidad de productor 0.750). En el caso de los píxeles clasificados en una clase a la que no pertenece, la clase de susceptibilidad baja fue la que tuvo más confiabilidad (0.939) y menos error de comisión (0.061), le continúan la clase media (error de omisión 0.104 y confiabilidad de productor 0.896), alta (error de omisión 0.138 y confiabilidad de productor 0.862) y muy baja (error de omisión 0.143 y confiabilidad de productor 0.857). La clase muy alta es la que más error de comisión tuvo (error de omisión 0.225 y confiabilidad de productor 0.775). La precisión global fue de 0.875 que equivale al 87.5% (Tabla 42).

**Tabla 42** Resultados de verificación en matriz de error para clases de susceptibilidad.

Referencia	Mapa								
	Clases de susceptibilidad	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	Total Fila	Confiabilidad productor	Error omisión
	Muy baja	18	4	2			24	0.750	0.250
	Baja	3	62	9			74	0.838	0.162
	Media			95	13		108	0.880	0.120
	Alta				144	9	153	0.941	0.059
	Muy alta				10	31	41	0.756	0.244
	Total columna	21	66	106	167	40	Precisión global	0.875	
	Confiabilidad usuario	0.857	0.939	0.896	0.862	0.775			
	Error de comisión	0.143	0.061	0.104	0.138	0.225			

A partir de estos resultados, se realizó una corrección a los datos de la matriz debido al posible submuestreo o sobremuestreo derivado de la asignación de puntos de validación en algunas clases. Para ello se utilizó la proporción de área validada por puntos de verificación. Con estas correcciones se observa que en la confiabilidad del productor no cambian los valores, pero en la confiabilidad del usuario si hay una disminución de algunas décimas para todas las clases. Estas modificaciones derivaron en una disminución de la precisión global que paso de tener una confiabilidad del 87.5% a una confiabilidad de 87.4% (Tabla 43).

**Tabla 43.** Resultados de verificación en matriz de error corregida para clases de susceptibilidad.

Referencia	Mapa								
	Clases de susceptibilidad	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta	Total Fila	Confiabilidad productor	Error omisión
	Muy baja	4.51	1.00	0.50			6.01	0.75	0.25
	Baja	0.76	15.77	2.28			18.81	0.84	0.16
	Media			24.11	3.30		27.41	0.88	0.12
	Alta				35.36	2.27	37.63	0.94	0.06
	Muy alta				2.47	7.67	10.14	0.76	0.24
	Total columna	5.27	16.77	26.89	41.13	9.94	Precisión global	0.8742	
	Confiabilidad usuario	0.86	0.94	0.90	0.86	0.77			
	Error de comisión	0.14	0.06	0.10	0.14	0.23			

Los resultados en la matriz de error corregida muestran que la confiabilidad del productor se mantuvo prácticamente igual, solo en la clase alta pasó de 0.941 a 0.940. Respecto a la



confiabilidad del usuario, esta disminuyo ligeramente en las clases muy baja (de 0.857 a 0.856), alta (de 0.862 a 0.860) y muy alta (de 0.775 a 0.772); pero aumento en las clases baja (de 0.939 a 0.940) y media (de 0.896 a 0.897). La confiabilidad global tuvo una disminución mínima pasando de 0.875 a 0.8742. Y en cuanto al intervalo de confianza global, este muestra un rango de 84.18 – 90.66 de confiabilidad, lo cual se traduce en que el mapa de áreas susceptibles a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo tiene una confiabilidad global del 87.42 %  $\pm$ 3.24 (Tabla 44).

**Tabla 44** Intervalos de confianza para las clases de susceptibilidad.

Clase de susceptibilidad	Confiabilidad productor	$\pm$	Intervalo de confianza productor	Confiabilidad del usuario	$\pm$	Intervalo de confianza usuario
Muy baja	0.75	0.15	0.61 - 0.90	0.86	0.14	0.72- 1.00
Baja	0.84	0.08	0.76 - 0.91	0.94	0.05	0.89 - 0.99
Media	0.88	0.08	0.80 - 0.96	0.90	0.06	0.84 - 0.95
Alta	0.94	0.06	0.87 - 1.00	0.86	0.06	0.80 - 0.91
Muy alta	0.76	0.15	0.60 - 0.91	0.77	0.13	0.64 - 0.90

Susceptibilidad global	Confiabilidad global	$\pm$	Intervalo de confianza global
Mapa	87.42	3.24	84.18 - 90.66

En resumen, el haber manejado los datos con un diseño de validación estratificado por clases de susceptibilidad y haber considerado los puntos de validación por la superficie que representan, contribuyo a que el mapa de áreas susceptibles a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo tenga una mayor confiabilidad en las clases de susceptibilidad baja, media y alta, tanto para la confiabilidad del productor como para la confiabilidad del usuario, la cual no estará asociada a un submuestreo o sobremuestreo de los puntos de validación. Además estas clases de susceptibilidad también poseen la mayor incidencia dentro de la subcuenca, situación que mejora la confiabilidad en la mayor parte del mapa. Respecto a los resultados de la confiabilidad global, esta muestra si se escogiera una ubicación aleatoria en el mapa, la probabilidad de que esta esté correctamente clasificada será del 87.42 %  $\pm$ 3.24, con lo que se demuestra que la validez del mapa es aceptable considerando que el mapa es un archivo raster con 21,161 píxeles y por ende la comprobación de cada uno de ellos resulta costosa en términos económicos.

## **4. Discusión**

El resultado final de este trabajo fue la obtención de un mapa de susceptibilidad que muestra la influencia del cambio de uso de suelo en la inestabilidad de ladera al interior de la subcuenca del Río Chiquito–Barranca del Muerto. En dicho mapa se observan cinco clases de susceptibilidad: muy baja, baja, media, alta y muy alta, así en este apartado se discutirán las distribuciones de dichas clases y su correspondencia con las variables evaluadas en este estudio. También se hace énfasis de las problemáticas enfrentadas y la posible solución para mejorar este trabajo.

### **4.1 Áreas susceptibles a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo**

Para las zonas con muy baja y baja susceptibilidad se encuentran en las CLSN, CL y RP). Estas geoformas se caracterizan por tener altas concentraciones de arena suelta en sus depósitos, las cuales tienen el potencial de ser afectadas por procesos gravitacionales. Sin embargo, la incidencia de los procesos gravitacionales es mínima (24 de los 483 eventos registrados en la subcuenca), debido principalmente a que estas geoformas se encuentran dentro del Parque Nacional Pico de Orizaba, donde la vegetación está bien preservada por la restricción de la extracción forestal.

Por otro lado, las zonas con susceptibilidad media se localizan principalmente en los LC. Esta geoforma tiene alta erosividad de la lluvia y alta incidencia de procesos gravitacionales previos; su suelo compacto, su baja permeabilidad y su alta densidad aparente favorecen la erosión y degradación de los depósitos donde la vegetación ha sido deforestada. La susceptibilidad media a lo largo de la RPI puede explicarse por sedimentos volcanoclásticos sueltos y degradados a lo largo de pendientes pronunciadas ( $> 42^\circ$ ) que carecen de cubierta vegetal natural. En este relieve, la vegetación natural se limita solo a las barrancas, lo que podría explicar la alta susceptibilidad de estas zonas.

La alta y muy alta susceptibilidad localizada en la geoforma de la LMC, está relacionada con la sobre-reforestación de sus depósitos, pendientes abruptas ( $> 42^\circ$ ) y procesos gravitacionales previos.

### **4.2 Problemáticas y perspectivas**

Una problemática en este trabajo es la referente al análisis de la erosividad de la lluvia, ya que la escasez de datos en las estaciones meteorológicas, así como las lagunas temporales podría haber influido en el análisis multicriterio, ya que el área de influencia para cada clase de intensidad afecta

el cálculo de los pesos en la suma lineal ponderada. Sin embargo, nuestro método junto con las observaciones de campo tiene el potencial de ser la base de un sistema integral para manejar y apoyar estudios prospectivos sobre inestabilidad de ladera. Además, los resultados de la erosividad de la lluvia pueden ser mejorados y refinados espacial y temporalmente con el uso de imágenes meteorológicas, o incluso obteniendo datos meteorológicos más detallados a nivel microambiental.

Por otro lado, la aplicación del método de sobreposición difusa para contruir la variable cartográfica de áreas asociadas a procesos gravitacionales por uso de suelo actual se enriqueció con el uso de índices de percepción remota y composiciones RGB que permitieron conocer la distribución de las 32 variables muestreadas en campo; es por ello que lo anterior contribuyó a obtener la ubicación de sitios con alta incidencia de procesos gravitacionales que requieren una atención urgente y con una metodología que puede realizarse en un tiempo relativamente corto y con bajos costos de operación.

Asimismo, la relevancia de nuestro modelo multivariado es el uso de cuatro variables cartográficas multitemporales (el cambio de uso de suelo (2003-2012), la incidencia de procesos gravitacionales (1994-2012), la erosividad de lluvias (1968-1989) y las áreas asociadas a procesos gravitacionales por uso de suelo actual al interior de la subcuenca) que no solo explican la influencia que el cambio de uso de suelo ha tenido en la inestabilidad de ladera en un periodo de tiempo establecido, sino que además permiten conocer la interacción que ocurre entre los aspectos físicos, biológicos y sociales que intervienen en la formación de procesos gravitacionales. Además, como ya se había mencionado en los antecedentes, el uso de análisis multivariados y sobreposición difusa no se habían empleado juntos en estudios que relacionan el cambio de uso de suelo y la inestabilidad de ladera, es por ello que nuestro trabajo permite una aproximación de su aplicación para la generación de mapas de susceptibilidad.

Así, los resultados de nuestro trabajo coinciden con otros estudios que han evaluado la influencia de cambio de uso de suelo en los procesos gravitacionales (Chen y Huang, 2013, Kipkosgei-Kilimo, 2014, Reichenbach et al., 2014), ya que esos estudios muestran que la pérdida de vegetación es uno de los principales factores involucrados en la formación de procesos gravitacionales. No obstante, en nuestro trabajo también se logró determinar que la sobrecarga del relieve ocasionado por intensivas reforestaciones también es responsable de la inestabilidad de ladera. Tal como ocurrió en la geofoma de LMC, donde la abundancia de árboles, los suelos erosionados y las altas lluvias aumentan la carga en la pendiente y desencadenan procesos gravitacionales. Este punto es importante en México porque una manera de tratar la erosión y los problemas gravitacionales es

sobre-siembra de árboles. Es por ello que si las reforestaciones no están reguladas pueden exacerbar la erosión y los problemas de inestabilidad de ladera, especialmente durante la temporada de lluvias. Finalmente, el análisis exhaustivo de los factores bióticos, abióticos y sociales involucrados en la inestabilidad de laderas permite utilizar nuestro modelo en áreas con intensos cambios de uso de suelo, pendientes pronunciadas y depósitos deleznable. Asimismo, nuestro modelo también establece las bases para identificar los sitios que deben regresar a su vegetación o usos menos intensivos.

## 5. Conclusiones

La subcuenca del Río Chiquito-Barranca del Muerto es un área con un intensivo cambio de uso de suelo, pendientes pronunciadas y depósitos erosionados, lo cual favorece la formación de procesos gravitacionales. Los cambios de uso de suelo aumentan gradualmente desde el Parque Nacional Pico de Orizaba (5675 m s. n. m.) hasta el corredor urbano en la parte baja del Pico de Orizaba (1280 m s. n. m.), sus causas son la agricultura, la tala ilegal, la urbanización y la implementación de terracerías y carreteras.

Los procesos gravitacionales más frecuentes son los deslizamientos someros superficiales, flujos de escombros y deslizamientos de escombros, con una mayor afectación en las geoformas rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.), ladera de montaña de roca caliza (Cretácico) y lomeríos de roca caliza (Mioceno-Plioceno).

En el mapa de susceptibilidad a inestabilidad de ladera por cambio de uso de suelo se logró una confianza global del 87.42 %  $\pm$ 3.24. En él se observa que las zonas con menor susceptibilidad están en las geoformas de coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka), colada de lava (16,500 años A.P.) y rampa piroclástica (16,500 años A.P.), las cuales están protegidas al interior del Parque Nacional Pico de Orizaba. Mientras que la mayor susceptibilidad a inestabilidad de ladera se ubica principalmente en las geoformas de rampa piroclástica indiferenciada (9000-8500 años A.P.) y ladera de montaña de roca caliza (Cretácico), situación que se acentúa en áreas con fuertes pendientes y presencia de procesos gravitacionales. Si bien la geoforma de lomeríos de roca caliza (Mioceno-Plioceno), también tiene una alta incidencia de procesos gravitacionales, su susceptibilidad media no es derivada totalmente de cambios de uso de suelo, sino del hecho de tener suelos compactos, poco permeables, con alta densidad aparente y procesos gravitacionales previos; los cuales durante la temporada de lluvias no son capaces de expulsar el agua excedente y tienden a desplazarse.

Los resultados de este trabajo podrían mejorar con el uso de nuevas herramientas de percepción remota (Imágenes LIDAR), pruebas de laboratorio para fertilidad y estructura de suelos, así como un incremento en el número de puntos de muestreo; con estas estrategias se podrían obtener resultados más detallados en los microambientes que componen cada una de las geoformas, particularizando a zonas reducidas el impacto que el uso de suelo tiene en el relieve.

No obstante, el modelo multivariado propuesto evalúa los factores físicos, biológicos y sociales involucrados en la formación de procesos gravitacionales. Se basa en un análisis jerárquico que define los grados de susceptibilidad a procesos gravitacionales por cambio de uso de suelo,

considerando tanto los factores desencadenantes de erosión de la lluvia, presencia de procesos gravitacionales previos y actividades antrópicas, como los factores condicionantes de estructura geomorfológica, estructura edáfica y conservación de la vegetación natural.

Es por ello que el método propuesto en este trabajo proporciona la base para la ubicación de los sitios de mitigación contra los procesos gravitacionales derivados del cambio en la cubierta terrestre; y dado el alcance de las variables propuestas en este trabajo, también es posible identificar y atenuar los factores que están actuando en cada geoforma.

Además, a pesar de las limitaciones por la información incompleta disponible para lluvias, el modelo y el mapeo de susceptibilidad tienen el potencial de ser la base de un método integrado para apoyar los estudios de predicción en procesos de inestabilidad de ladera.

Siendo así, a partir de los resultados de este trabajo se recomienda una mayor protección de los límites de las geoformas de coladas de lava de Sierra Negra (900-600 Ka), colada de lava (16,500 años A.P.) y rampa piroclástica (16,500 años A.P.), a fin de detener el disturbio por uso de suelo que está filtrándose al interior del Parque Nacional Pico de Orizaba. Por otro lado, la vegetación natural que se encuentra fuera del Parque Nacional Pico de Orizaba podría contener la formación de nuevos procesos gravitacionales, sin embargo, las actividades forestales extractivas no favorecen su desarrollo y a su vez agravan el problema.

Es por ello que, si se busca mitigar los efectos de la formación de procesos gravitacionales, se debe hacer una concientización sobre el uso de los recursos forestales encaminada a la extracción maderera responsable. Esta puede incluir actividades de agroforestería que, al plantar árboles en campos agrícolas en las zonas cercanas a las laderas, permitan la generación de recursos económicos y contribuyan a la protección del relieve para evitar futuros procesos de inestabilidad de ladera. Esta reforestación debe respetar la dinámica interna propia de un ecosistema, es decir, plantar árboles propios del tipo de vegetación con un modelo de distancias entre árboles como ocurriría naturalmente con las relaciones intra e interespecíficas; de lo contrario solo se contribuiría la formación de nuevos procesos gravitacionales, tal como ocurrió en ladera de montaña de roca caliza.

Finalmente, se puede decir que la aplicación del modelo multivariado propuesto en este trabajo muestra su utilidad en áreas con cambio intensivo de cobertura vegetal, pendientes abruptas y depósitos erosionados-deleznables, ya que sigue un análisis exhaustivo de factores bióticos, abióticos y sociales involucrados en la formación de procesos gravitacionales; lo cual permite establecer las bases para identificar sitios que deben regresar a su vegetación natural o en los que

deben implementarse planes de mitigación que eviten nuevas afectaciones a las comunidades que se ubican en la base de la subcuenca.

## 6. Referencias

- Abarca, O. y Quiroz, J. (2005). Modelo cartográfico de riesgo de incendios en el Parque Nacional Henry Pittier. Estudio de caso: Vertiente sur, área colindante con la ciudad de Maracay. Maracay, Aragua: Agronomía Tropical, 55(1).
- Aceves-Quesada, F., Legorreta-Paulín, P., Lugo-Hubp, J., Umaña-Romero, J. and Legorreta-Cuevas, H. A. (2016). Sistemas de información geográfica y cartografía geomorfológica aplicados al inventario de deslizamientos y cartografía de susceptibilidad en la cuenca del río El Estado, Pico de Orizaba, México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. Vol. 2016, Issue, 91:43-55
- Alcántara, I., Echavarría, A., Gutiérrez, C., Domínguez, L., Noriega, I. (2008). Inestabilidad de laderas. Serie Fascículos. CENAPRED.
- Alonso, C., Moreno, V., Rodríguez, E. (1999). Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. una sencilla practica de introducción a la teledetección. Teledetección. Avances y aplicaciones. VIII congreso Nacional de Teledetección. Albacete, España. 429-432p.
- Arnoldus, H. M. (1980). An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation. In Assessments of Erosion, de Boodts M, Gabriels D (eds). John Wiley and Sons Ltd, Chichester 127–132p.
- Barber, C., Schweithelm, J. (2000). Trial by fire: Forest fires and forestry policy in Indonesia's era of crisis and reform. World Resources Institute, Washington D.C. 88 p.
- Baret, F., G. Guyot, y D. Major. (1989). TSAVI: A Vegetation Index Which Minimizes Soil Brightness Effects on LAI and APAR Estimation, 12th Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'90, Vancouver, Canada, 4 p.
- Baret, F. y Guyot. D. (1991). Potentials and limits of vegetation índices for LAI and APAR assessment. Remote Sensing. 35 (2-3): 161-173.
- Batterbury, S., Bebbington, A. (1999). Environmental histories: Access to resources and landscape change. Land Degrad Dev 10: 279–289p.
- Bidwell, R. 1979. Fisiología vegetal. AGT Editor. S.A, México. 123-175.
- Billington, C., Kapos, V., Edwards, M., Blyth, S., Iremonger, S. (1996). Estimated original forest cover map: A first attempt. World Conservation Monitoring Center, Cambridge.
- Bocco, G., Mendoza, M. y Masera, O. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas 44. Instituto de Geografía, UNAM. México. 18-38p.
- Brardinoni, F., Slaymaker, O., Hassan, M. (2003). Landslide inventory in a rugged forested watershed: a comparison between air-photo and field survey data. Geomorphology 54: 179-196p.
- Campbell, J. B., (2011). Introduction to remote sensing. 5th Ed., The Guilford Press, USA. 306-307p.
- Capra, L., Borselli, L., Varley, N., Norini, G., Gavilanes-Ruiz, J.C., Sarocchi, D. y Caballero, L. (2010). Rainfall-triggered lahars at Volcán de Colima, Mexico: surface hydro-repelleny as initiation process. Journal of Volcanology and Geothermal research. Volume 189, Issues 1-2: 105-117p.
- Card, D. (1982). Using known map category marginal frequencies to improve estimates of thematic map accuracy. Photogrammetric Engineering and remote sensing. Vol. 48. Num. 3. pp 431-439.
- Carrasco-Núñez, G., Vallance, J. y Rose, W. (1993). A voluminous avalanche induced lahar from Citlaltépetl volcano, México: Implications for hazard assessment. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 59: 35-46p.

- Carrasco-Núñez, G. y Rose, W.I. (1995). Eruption of a major Holocene pyroclastic flow at Citlaltepétl volcano (Pico de Orizaba), México, 8.5-9.0 ka. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 69: 197-215p.
- Carrasco-Núñez G. y Gómez-Tuena, A (1997). Volcanogenic sedimentation around Citlaltepétl (Pico de Orizaba) volcano and surroundings, Veracruz, México. IAVCEI Gen Assem excursions. Universidad Nacional Autónoma México. Excursiones del Instituto Geología. 16: 131–151p.
- Carrasco-Núñez, G. (2000). Structure and proximal stratigraphy of Citlaltepétl volcano (Pico de Orizaba), México, en: Delgado- Granados, H., Aguirre-Díaz, G., Stock, J.M., (eds.). *Cenozoic volcanism and tectonics of México*. Boulder, Colorado, Geological Society of America Special Paper, 334: 247-262p.
- CFE (2006). Proyecto para el control integral de torrentes en la cuenca del Río Blanco, Veracruz, México. IV Foro mundial del agua. México.
- Chacon, J., Irigaray, C., Fernandez, T. y El Hamdouni, R. (2003). Susceptibilidad a los movimientos de ladera en el sector central del la Cordillera Bética. En: Ayala, F, y Corominas, J. (eds.) *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y Aplicaciones en España*. 83-96p. I.G.M.E, Serie Medio Ambiente. 4: 191p.
- Chen, C. Y. and Huang, W. L. (2013). Land use change and landslide characteristics analysis for community-based disaster mitigation. *Environmental Monitoring and Assessment*. Vol. 185, Issue 5: 4125-4139. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-012-2855-y>
- Clark, R., Swayze, G., Wise, R., Livo, K., Hoefen, T., Kokaly, R., Sutley, S. (2003). USGS Digital Spectral Library splib, U.S. Geological Survey, Open File Report 03-395p.
- CLICOM. 2014. Base de datos climatológica nacional. <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Cogalton, R. G. (1991). A review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Enviroment*. 37: 35-46p.
- CONAGUA (2012). Programa de gestión: Comité Cuenca del Río Blanco. Comisión Nacional del Agua. 101 p.
- CONABIO (1998). Uso de suelo y vegetación de INEGI agrupado por CONABIO. Escala 1:1 000 000. Modificado de: Instituto nacional de estadística y geografía. *Uso de suelo y vegetación, 1996*. Escala 1:1 000 000. Primera edición. Comisión nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). (2015). *Silvicultura y manejo forestal*. <http://www.conafor.gob.mx/web/temas-forestales/silvicultura-y-manejo-forestal/>
- Corominas, J. y García-Yagüe, A. (1997). Terminología de los movimientos de ladera. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. Granada. 3: 1051-1072p.
- Crausaz, W. (1994). Pico de Orizaba or Citlaltepétl: Geology, Archeology, History, Natural History and Mountaineering Routes. *Geopress International*. 594p.
- Cruden, D., Varnes, D. (1996). Landslide types and processes. In Turner, A., Schuster, R. (Eds): *Landslides. Investigation and mitigation*. Transportation Research Board Special Report 247. National Academy Press. Washington D.C. 36-75p.
- Cuanalo, O. y Melgarjo, G. (2002) *Inestabilidad de Laderas Sierra Norte y Nororiental del Estado de Puebla*. Ciencia y Cultura. 9p.
- Daniels, R., Hammer, R. 1992. *Soil geomorphology*. Wiley, New York.
- De la Cruz-Reyna, S. y Carrasco-Núñez, G. (2002). Probabilistic hazard analysis of Citlaltepétl (Pico de Orizaba) Volcano, Eastern Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 113: 307-318p.
- Delendatti, G. (2003). Caracterización de zonas de alteración hidrotermal en las márgenes del río Castaño, provincia de San Juan, mediante procesamiento digital de imágenes TM. *Revista de la Asociación Geologica Argentina*. 58, 1: 97-108p.
- Delgado, H., Navarro, M., Abimelec, I. (2002). Mapa de amenaza volcánica Volcán Concepción III. UNAM-México, JICA e Ineter. Managua. Nicaragua
- Dikau, R., Brunsten, D., Schrott, L., Ibsen, M. (Eds). (1996). *Landslide recognition: identification, movement and causes*. John Wiley and Sons. 251p.



- Dirzo, R. (1991). Rescate y restauración ecológica de la selva de Los Tuxtlas. *Ciencia y Desarrollo*. 17. 33-46p.
- Dirzo, R., García, M. (1992). Rates of deforestation in Los Tuxtlas, Veracruz, México. *Conservation Biology*. 6, 1: 84-90p.
- Ellis, E. y Martínez, M. (2010) *Vegetación y Uso de Suelo*. Patrimonio Natural. 205-226p.
- El Universal (2003). Estallido en Veracruz; 5 muertos. (2003, 6 de junio). El Universal, Estados.
- EMDM. (1999). Atzitzintla, Chalchicomula de Sesma, C. Mendoza, La Perla, Maltrata, Mariano Escobedo y Nogales. Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México. <http://www.e-local.gob.mx>
- ENVI. (2004). ENVI User's Guide. ENVI Version 4.1. Research Systems Inc.
- ESRI. (2016). Environmental Systems Research Institute: Pertenencia difusa en ArcMap <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/fuzzy-membership.htm>
- ESRI. (2016). Environmental Systems Research Institute: Sobreposición difusa en ArcMap. <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/fuzzy-overlay.htm>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (2004). FAOSTAT data. FAO, Rome, <http://apps.fao.org>
- FAO-UNESCO. 1971-1981. Soil map of the world 1:5 000 000. 10 Volumes. Paris, UNESCO.
- Fukuoka, H. (2010). Informe Preliminar de Investigación referente a (1) Desastres de Flujo de Escombros en el Volcán de San Vicente Nov. 2009, y (2) Riesgo a Flujo de Escombros en el Volcán de San Salvador, El Picacho. Centro de Investigación sobre Deslizamientos Instituto de Investigación para la Prevención de Desastres Universidad de Kyoto.
- Gandía, S., Meliá, J. (2003). La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos Renovables: Agricultura. Curso de Postgrado Valencia, 25 de febrero-9 de marzo 1991. Universitat de Valencia. 85-94p.
- Garfías, R., Castillo, M. y Yáñez, A. (2012). Método fuzzy para la identificación de áreas potenciales para la producción de leña. Aplicación de caso: Comuna de Empedrado, Región del Maule, Chile. *Geographicalia*. 61, 5-23
- Gómez-Mendoza, L., Vega, E., Ramirez, I., Palacio, J., Galicia, L. (2006). Projecting land-use change processes in the Sierra Norte of Oaxaca, México. *Applied Geography*. 26: 276-290p.
- Guevara, S., Sánchez-Ríos, G., Landgrave, R. (2004). La Deforestación. En: Los Tuxtlas. El paisaje de la sierra. Instituto de Ecología. A. C. 288p.
- Gupta, R. 2003. Remote sensing geology. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 19-52p.
- Gutiérrez, J. y Jegat, H. (2005). Uso de la teoría de lógica difusa en la clasificación de imágenes satelitales con coberturas mixtas: el caso urbano de Mérida, Venezuela. *Interciencia, Asociación Interciencia Caracas, Venezuela*. vol. 30, núm. 5. pp. 261-266
- Höskuldsson, A. (1992). Le complexe volcanique Pico de Orizaba-Sierra Negra-Cerro Las Cumbres (sud-est mexicain): structure, dynamismes eruptifs et evaluations del areas: Clermont-Ferrand, Francia, Université Blaise Pascal, Tesis doctoral, 210 p.
- Höskuldsson, A., Robin, C. (1993). Late Pleistocene to Holocene eruptive activity of Pico de Orizaba, eastern México. *Bulletin of Volcanology*. 55: 571-587p.
- Höskuldsson, A. y Cantagrel, J. M. (1994). Volcanic hazards in the surroundings of Pico de Orizaba, eastern Mexico. *Natural Hazards* 10: 197-219p.
- Huete, A.R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), Remote Sensing of Environment, 25(3): 295-309.
- Hutchinson, J. (1988). Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In Bonnard, Ch. (Ed.): Landslides. Proceedings 5th International Conference on Landslides. Lausanne. 1: 3-35p.
- INEGI (1984). Orizaba E14-6 Carta Geológica. Escala 1:250 000. Instituto nacional de estadística y geografía. Primera Edición.
- INEGI (2006). Conjunto vectorial. Serie II. Escala 1:250 000. Instituto nacional de estadística y geografía. Segunda edición.
- INEGI (2007). Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. <http://www.inegi.org.mx>

- INEGI (2008). Ortofoto digital E14B56. Escala 1:40,000. Instituto nacional de estadística y geografía.
- INEGI. (2010). Censo de población y vivienda 2010. Instituto nacional de estadística y geografía. <http://www.censo2010.org.mx/>
- INEGI. (2014). Guía para la interpretación de cartografía. Uso de Suelo y vegetación. Escala 1:250 000 serie V. Instituto nacional de estadística y geografía. México. pp. 200.
- Johnson, S. (1986). Agricultural intensification in Thailand: Complementary role of infrastructure and agricultural policy. In: Easter WK (ed) Irrigation investment, technology, and management strategies for development. Westview, Boulder. 111–127p.
- Kaufman, Y., Wald, A., Remer, L., Gao, B., Li, R., Flynn, L. (1997). The MODIS 2.1- $\mu$ m channel Correlation with visible reflectance for use in remote sensing of aerosol. IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing. 35: 1286-1298p.
- Kauth, R.J., y G.S. Thomas. (1976). The Tasseled Cap - A Graphic Description of the Spectral Temporal Development of Agricultural Crops As Seen By Landsat. Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 41-51.
- Kayastha, P., Dhital, M. R. and De Smedt, F. (2013) Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslides susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal. Computers and Geosciences. 52: 398-408. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2012.11.003>
- Kerle, N. y Wyk de Vries, B. (2001). The 1998 debris avalanche at Casita volcano, Nicaragua investigation of structural deformation as the cause of slope instability using remote sensing. Journal of Volcanology and Geothermal Research. 105: 49-63p.
- Kipkosgei-Kilimo, Robert. (2014). Land cover changes and landslide occurrence: A case of Tirap Division in Elgeyo Marakwet county, Kenya. University of Nairobi. Department of Urban and Regional Planning.
- Lambin, E., Geist, H. (2001). Global land-use/land-cover changes: What have we learned so far? IGBP Global Change Newsletter No. 46, June 2001. 27–30p.
- Lambin, E., Geist, H. (2003). The land managers who have lost control of their land use: Implications for sustainability. Trop Ecol 44: 15–24p.
- Lambin, E. y Geist, H. (2006). Land-use and land-cover change. Local processes and global impacts. Springer.
- Lamolda, H. (2008). Estudio de la influencia de las correcciones a imágenes Landsat ETM+ en la obtención de propiedades de cubiertas vegetales. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y Cartografía. 13-18p.
- Lavorel, S., Flannigan, M., Lambin, E., Scholes, M. (2005). Vulnerability of land systems to fire: Interactions between humans, climate, the atmosphere and ecosystems. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, vol. 10
- Legorreta-Paulín, G. y Lugo-Hubp, J. (2014). Zonación de peligros por procesos gravitacionales en el flanco suroccidental del Volcán Pico de Orizaba, México. Investigaciones Geográficas. Num. 84: 20-31p.
- Legorreta-Paulín, G., Bursik, M., Solene, P., Lugo-Hubp, J., Paredes-Mejía, L. M. y Aceves-Quesada, F. (2014). Inventario multitemporal, análisis de susceptibilidad y estimación de volumen de deslizamientos en el flanco SW del volcán Pico de Orizaba, Puebla-Veracruz. Boletín de la sociedad Geológica Mexicana. Vol. 66:343-354
- Lillesand, T., Kiefer, R., Chipman, J. (2008). Remote sensing and image interpretation. John Wiley and Sons, Inc. 12-29p.
- Lobo, D., Lozano, Z. and Delgado, F. (2005). Water erosion risk assessment and impact on productivity of a Venezuelan soil. Catena 64:297p.
- Lugo-Hubp, J. (1991). Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos Cartográficos). Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F.
- Lugo-Hubp, J. (2011). Diccionario geomorfológico. Geografía para el siglo XXI. Serie Textos Universitarios. Universidad Nacional Autónoma de México. Primera edición.

- Macías, J. L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Volumen conmemorativo del centenario. Tomo LVII. 3379-424p.
- Macías, J. L., Saucedo, R., Gavilanes, J., Varley, N., Velasco, S., Bursik, M., Gutierrez, V. y Cortés, A. (2006). Flujos piroclásticos asociados a la actividad explosiva del Volcán de Colima y perspectivas futuras. GEOS. 25: 3p.
- Marcano, A., Cartaya, S., Pacheco, H. y Méndez, W. (2015). Estimación de pesos ponderados de variables para la generación de mapas de susceptibilidad a través de la Evaluación Espacial Multicriterio (EEM). Terra Nueva Etapa. Vol. XXXI, Núm. 50: 55-80pp.
- Martínez, J. y Díaz, A. (2005). Percepción remota: fundamentos de teledetección espacial. Comisión Nacional del Agua.
- Mas, J., Díaz-Gallegos, J. y Pérez, A. (2003). Evaluación de la confiabilidad temática de mapas o imágenes clasificadas: una revisión. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 51. pp. 53-72.
- Mas, J. F., Velázquez, A., Díaz, J., Mayorga, R., Alcántara, C., Bocco, G., Castro, R., Fernández, T., Pérez, A. (2004). Assessing land use/cover changes: a nationwide multivariate spatial database for México. Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 5: 249-261p.
- Mas, J., Pérez, A., Ghilardi, A., Martínez, S., Loya-Carrillo, J. y Vega, E. (2014). A suite of tools for assessing thematic map accuracy. Geography Journal. Volume 2014. <http://www.hindawi.com/journals/geography/2014/372349/>
- McConnell, W., Keys, E. (2005). Meta-analysis of agricultural change. In: Moran EF, Ostrom E (eds) Seeing the forest and the trees: Human-environment interactions in forest ecosystems. MIT Press, Cambridge London, 325–353p.
- Membrillo, A. 2011. Estudio del cambio estacional de la respuesta espectral en el lago de Chapala, Jalisco. Tesis. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mendoza, M., Noriega, I. y Domínguez, L. (2000). Deslizamientos de laderas en Teziutlán, Puebla, provocados por las lluvias intensas de octubre 1999. SEGOB. CENAPRED.
- Mendoza, M., Domínguez, L. (2006). Estimación de la amenaza y el riesgo de deslizamientos en laderas. Guía básica para la elaboración de atlas estatales y municipales de peligros y riesgos. SEGOB-CENAPRED. México
- Metternicht, G., Hurni, L., Gogu, R. (2005). Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. Remote Sensing of Environment. 98: 284-303p.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2003). Ecosystems and human well-being: A framework for assessment. Island Press, Washington D.C. 245p.
- Mortimore, M., Tiffen, M. (1994). Population growth and a sustainable environment. Environment 36, 8: 10p.
- Myers, N., Kent, J. (2001). Perverse subsidies: How tax dollars can undercut the environment and the economy. Island Press, Washington D.C. 277p.
- Nemcok, A.; Pasek, J., Ryber, J. (1972). Classification of landslides and other mass movements. Rock Mechanics. 4: 71-78p.
- Olivas-Gallegos, U. E., Valdez-Lazalde, J. R., Aldrete, A., González-Guillén, M. and Vera-Castillo, G. (2007) Areas with aptitude to establish maguey cenizo plantations: definition by multicriteria analysis and GIS. Fitotec, Mexico. 30 (4): 411-419.
- Palacios, D., Parrilla, G. y Zamorano, J. (1999). Paraglacial and postglacial debris flows on a Little Ice Age terminal moraine: Jamapa Glacier, Pico de Orizaba (México). Geomorphology. 28: 95-118p.
- Palacio, J. L., Bocco, G., Velázquez, A., Mas, F., Takaki, F., Victoria, A., Luna, L., Gómez, G., López, J., Palma, M., Trejo, I., Peralta, A., Prado, J., Rodríguez, A., Mayorga, R. y González, F. (2000). La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del inventario forestal nacional 2000. Investigaciones Geográficas 43. Instituto de Geografía, UNAM. México. 183-203p.
- Peñalva-Rosales, L. P. (2000) Proposals of fuzzy logic in decision making. Politics and Culture Metropolitan Autonomous University Xochimilco Unit Federal District, Mexico. 13: 97-112.

- Perry, C. Jr., y L.F. Lautenschlager. (1984). Functional Equivalence of Spectral Vegetation Indices, *Remote Sensing of Environment*, 14(1-3): 169-182.
- Pineda, N., Bosque, J., Gómez, M. y Plata, W. (2009). Análisis de cambio del uso de suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. *Investigaciones Geográficas* 69. Instituto de Geografía, UNAM. México. 33-52p.
- Pizarro, R., Ausensi, P., Aravena, D. y Sangüesa, C. (2003). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones pluviométricas de la VII Región del Maule, Chile. Centro Tecnológico de hidrología ambiental. Universidad de Talca, Chile.
- Pourghasemi, H. R., Pradhan, B. and Gokceoglu, C. (2012). Application of fuzzy logic and analytical hierarchy process (AHP) to landslide susceptibility mapping at Haraz watershed, Iran. *Natural Hazards*, Vol. 63: 965-996. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-012-0217-2>
- Qi, J., A. Chehbouni, A.R. Huete, Y.H. Kerr., y A. Sorooshian. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index, *Remote Sensing of Environment*, 48(2):119-126.
- Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, A. C. and Rossi, M. (2014). The Influence of Land Use Change on Landslide Susceptibility Zonation: The Briga Catchment Test Site (Messina, Italy). *Environ Manage.* Vol. 56 (6): 1372-1384. <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-014-0357-0>
- Rencz, A. (1999). *Remote sensing for the Earth sciences. Manual of remote sensing.* John Wiley and Sons, Inc. 111-188p.
- Richards, J. (1990). Land transformation. En: Turner, B., Clark, W., Kates, R., Richards, J., Mathews, J., Meyer, W. (eds) *The Earth as transformed by human action: Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years.* Cambridge University Press, Cambridge. 163–178p.
- Richards, J., Xiuping, J. (2006). *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction.* 4th Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 193-266 p.
- Richardson, A.J., y C.L. Wiegand. (1977). Distinguishing Vegetation From Soil Background Information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 43(12):1541-1552.
- Roa, J. 2007. Estimación de áreas susceptibles a deslizamientos mediante datos e imágenes satelitales: cuenca del río Mocotíes, estado de Mérida-Venezuela. *Revista geográfica Venezolana*, Vol. 48 (2): 183-219.
- Robin, C. y Cantagrel, J. M. (1982). Le Pico de Orizaba (Mexique): structure et evolution d'un gran andésitique complexe. *Bulletin of Volcanology*, 45: 299-315p.
- Rodríguez, S., Mora, I. y Murrieta, J. (2006). Flujos de baja concentración asociados con lluvias de intensidad extraordinaria en el flanco sur del Volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl), México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Número Especial de Geología Urbana.* 2: 223-236p.
- Rosete, F., Pérez, J. y Bocco, G. (2008). Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones Geográficas.* 67: 39-58p.
- Rossotti, A. (2005). *Reconstrucción de la historia eruptiva de la Pómez Citlaltépetl (Volcán Pico de Orizaba).* Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias. Posgrado en Ciencias de la Tierra, Juriquilla, Querétaro, Tesis doctoral, 142 p.
- Rouse, J.W. Jr., R.H. Haas, D.W. Deering, Schell, J.A., y J.C. Harlan. (1974). *Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation, NASA/GSFC Type III Final Report, Greenbelt, MD.,* 371p.
- Ruiz, R., (2006). *Evaluación multitemporal de cambios en la cubierta vegetal y el uso del suelo en el sur de Quintana Roo, México.* Tesis Facultad de Filosofía y Letras.
- Rzedowski, J., 2006. *Vegetación de México.* 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Sader, S., Chowdhury, R., Schneider, L., Turner, B. (2004). Forest change and human driving forces in Central America. En: Gutman, G., Janetos, A., Justice, C. Moran, E., Mustard, J., Rindfuss, R., Skole, D., Turner, B., Cochrane, M. (eds) *Land change science: Observing, monitoring and understanding trajectories of change on the Earth's surface.* Remote Sensing and Digital Image Processing Series 6, Kluwer Academic, Dordrecht Boston London. 57–76p.
- Sanderson, E., Jaiteh, M., Levy, M., Redford, K., Wannebo, A., Woolmer, G. (2002). The human footprint and the last of the wild. *BioScience* 52, 10: 891–904p.

- Sassa, K. (1989). Geotechnical classification of landslides. *Landslide News*. 3: 21-24p.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal Services Sciences UK*, Volume 1. No. 1. pp. 83-98.
- Saucedo, R., Macías, J., Sarocchi, D., Bursik, M. y Rupp, B. (2008). The rain-triggered Atenquique volcaniclastic debris flow of Octubre 16, 1955 at Nevado de Colima Volcano, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 173: 69-83p.
- Schaetzl, R., Anderson, S. (2005). *Soils Genesis and Geomorphology*. Cambridge. University Press.
- Scott, K., Vallece, J., Kerle, N., Macías, J., Strauch, W., Devoli, G. (2004). Catastrophic precipitation-triggered lahar at Casita volcano, Nicaragua: occurrence, bulking and transformation. *Earth surface Processes and Landforms*.
- Segado, F. (1996). *Principios de Teledetección*. Servicio de Publicaciones Universidad de Murcia. 13p
- Seno, S., Thüring, M. 2006. Large landslides in Ticino, Southern Switzerland: Geometry and kinematics. *Engineering Geology*. 83: 109-119p.
- SGM (2000). Veracruz E14-3. Carta Geológico-Minera. Escala 1:250 000. Servicio Geológico Mexicano. Primera edición.
- SGM (2001). Orizaba E14-6. Carta Geológico-Minera. Escala 1:250 000. Servicio Geológico Mexicano. Primera edición.
- Sharpe, C. (1938). *Landslides and related phenomena*. New Jersey. Pageant Books Inc.
- Sheridan M.F, Carrasco-Núñez G., Hubbard B.E., Siebe, C. y Rodríguez-Elizarráz, S. (2001), Mapa de Peligros del Volcán Citlaltépetl (Pico de Orizaba), escala 1:250,000: Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma de Puebla, Gobierno del Estado de Veracruz, 1 mapa.
- Schowengerdt, R. (2007). *Remote Sensing. Models and Methods for image processing*. 3th Ed. Elsevier. USA. 128-340 p.
- Siebe, C., Jahn, R. y Starhr, K. (2006). Manual para la descripción y evaluación de suelos en el campo. 2da Edición. Publicación Especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. 57p.
- Silleos, N., Alexandrisdis, T., Gitas, I., y Perakis, H. (2006). Vegetation Indices: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years. *Geocarto International*, Vol. 21, No. 4. 21-28p.
- SGM (2000). Veracruz E14-3. Carta Geológico-Minera. Escala 1:250 000. Servicio Geológico Mexicano. Primera edición.
- SGM (2001). Orizaba E14-6. Carta Geológico-Minera. Escala 1:250 000. Servicio Geológico Mexicano. Primera edición.
- Singh, S., Rodríguez, M. y Espíndola, J. (1984). A catalog of shallow earthquakes of México from 1900 to 1981. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 74: 267-279p.
- Smith, G. y Fritz, W. (1989). Volcanic Influences on terrestrial sedimentation. *Geology*. 17: 375-376p.
- SMN (2013). Normales climatológicas por estación. <http://smn.cna.gob.mx>
- Stone, G. (1996). *Settlement ecology: The social and spatial organization of Kofyar agriculture*. University of Arizona Press, Tucson.
- Stueve, M., Housman, I., Zimmerman, P., Nelson, M., Webb, J., Perry, C., Chastain, R., Gormanson, D., Huang, C., Healey, S., Cohen, W. (2011). Snow-covered Landsat time series stacks improve automated disturbance mapping accuracy in forested landscapes. 115: 3203-3219p.
- Taiz, L., Zeiger, E. (2006). *Fisiología Vegetal*. Vol. 1. Universitat Jaume. 322p.
- Tamés, A., Borja, C. y Alonso, M. (2015). Lógica difusa en la extracción de coberturas del terreno.
- Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos. XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección. (Eds. J. Bustamante, R. Díaz-Delgado, D. Aragonés, I. Afán y D. García). pp. 435-438.
- Tardin, A., Lee, D., Santos, R., De Assis, O., Dos Santos de Barbosa M., De Lourdes Moreira, M., Pereira, M., Silva, D., Dos Santos Filho, C. (1980). Subprojeto desmatamento: Convênio IBDF/CNPq – INPE. Technical report INPE-1649-RPE/103, Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

- Toríz G. J. (1990) Informe final del prospecto: Orizaba; Compilación geológica. Prospecto I.G.P.R.-288, Petróleos Mexicanos, Departamento de Exploración, Zona Centro.
- Turner, B. (2002). Toward integrated land-change science: Advances in 1.5 decades of sustained international research on landuse and land-cover change. En: Steffen, W., Jäger, J., Carson, D., Bradshaw, C. (eds) Challenges of a changing Earth: Proceedings of the Global Change Open Science Conference, Amsterdam, The Netherlands, 10–13 July 2001. (The IGBP Series), Springer, Berlin Heidelberg. 21–26p.
- Van Den Eeckhaut, M., Poesen, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Moeyerson, J., Nyssen, J., Van Beek, L. (2005). The effectiveness of hillshade maps and expert knowledge in mapping old depp-seated landslides. *Geomorphology*. 67: 351-363p.
- Varnes, D. (1978). Slope movement types and processes. In Schuster, R. and Krizek R. (Eds.) Landslides: analysis and control. Transportation Research Board. Special report. 176: 11-339p.
- Velázquez, A., Mas, J., Díaz, J., Mayorga, R., Alcántara, P., Castro, R., Fernández., Bocco, G., Ezcurra, E. y Palacio, J. (2002). Patrones y tasas de cambio del uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*. 62: 21-37p.
- Viguera-Velázquez, M. E., Carbajal-Hernández, J. J., Sánchez-Fernández, L. P. and Hernández-Martínez, M. (2016) Computational model for the evaluation of water quality in white fish farming. Educational tracks. National Technological Institute of Mexico / Technological Institute of Celaya, Mexico.
- Vikhamar, D., Solberg, R. (2003). Snow cover mapping in forests by constrained linear spectral unmixing of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*. 88: 309-323p.
- Villegas, R., Muñoz, C., Muñoz, O., Gallo, C. y Ponce, L. (2011). Tasa de cambio de uso de suelo en el Parque Nacional Pico de Orizaba, Veracruz, México. Periodo 2003-2011. CONANP e INECOL. 47 p.
- Walther D. y Shabaani S (1991). Large scale monitoring of rangelands vegetation using NOAA/AVHRR LAC data: application to the rainy seasons 1989/90 in northern Kenya, Range Management Handbook of Kenya, III/4. Nairobi
- Werner, G. (1996). La Vegetación destruida en el altiplano mexicano. *Elementos* 2: 9-25p.
- Williamson, M. (2009). Análisis multitemporal para la detección de cambios en el uso de suelo en tres municipios afectados por el huracán Juana. *Wani*. 58: 52-57p.
- Wischmeier, W. H., Johnson, C. B. y Cross, B. V. (1971). A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *Journal of Soil and Water Conservation*. 26: 189-193.
- WRB (2007). Base referencial mundial del recurso suelo. Un marco conceptual para clasificación, correlación y comunicación internacional. IUSS, ISRIC y FAO. Primera actualización. 130 p.
- Zadeh, L. A. 1965. Fuzzy Sets. *Information and Control* 8(3), 338-353.
- Zamorano, J. (1990). Análisis ingeniero-geomorfológico de la Cuenca de México, tesis de Doctorado, Universidad Estatal de Moscú, Lomonosov, URSS.
- Zimbelman, D., Watters, R., Firth, I., Breit, G. y Carrasco-Núñez, G. (2004). Stratovolcano stability assessment methods and results from Citlaltépetl, México. *Bulletin of Volcanology*. 66: 66-79p.