
Distribución espacial

y temporal de deslizamientos (1999-2015) en la cuenca del río Combeima, Colombia

Spatio-temporal distribution of slides (1999-2015)
in Combeima's River hydrographic basin, Colombia

Julián Leal Villamil¹

Uriel Pérez Gómez¹

Nidia Esperanza Ortiz Lozano²

¹ Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Forestal.

² Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería Agronómica.
Ibagué (Tolima), Colombia

jlealv@ut.edu.co

uperez@ut.edu.co

neortizl@ut.edu.co

Resumen

Los deslizamientos son eventos que degradan el suelo y son causados por factores geológicos, geomorfológicos, climatológicos y antrópicos. Este estudio tuvo por objeto analizar la distribución espacial y temporal de los deslizamientos sucedidos durante 16 años en la cuenca hidrográfica del río Combeima (Ibagué-Tolima), utilizando tecnologías geoespaciales. Se analizó el efecto de variables geológicas, pendiente, ubicación en la cuenca y la red vial. Para esto se utilizaron registros históricos, interpretación visual de imágenes y trabajo de campo para la identificación de nuevos deslizamientos y verificación de los interpretados visualmente. Fueron encontrados 366 deslizamientos distribuidos, principalmente, en zonas de ladera en la parte baja de la cuenca con elevaciones menores a 1.500 msnm, con una densidad de 1,34 deslizamientos por km². El 46,7 % de los eventos se localizan en zonas de pendientes escarpadas y el 35,4 % en zonas con pendientes moderadamente escarpadas.

Palabras clave: SIG; *RapidEye*; ortofotomosaico; interpretación visual; deslizamientos.

Abstract

Slides are events that degrade soil, and are caused by geological, geomorphological, climatic and anthropic factors. The aim of this study was to analyze the spatial and temporal distribution of slides for 16 years on the Combeima river basin (Ibagué-Tolima) by using geospatial technologies. The effect of geological variables, slope, location on the basin and the road network was analyzed. For this, historical records, visual interpretation of images, and fieldwork for the identification of new slides and the verification of those that were visually interpreted were used. 366 slides were found to be distributed mainly in hillside areas of the lower basin under 1.500 m.a.s.l. with an intensity of 1,34 slides per squared kilometer. 46.7 % of the events are located on areas with steep slopes and 35.4 % in moderately steep areas.

Key words: *GIS; RapidEye; orthophotomosaic; visual interpretation; slides.*

1. Introducción

Los deslizamientos ocurridos en los suelos pueden causar enormes daños materiales y humanos en las regiones montañosas (Karsli *et al.*, 2009; Metternicht *et al.*, 2005). Eventos pequeños, afectan los taludes de las carreteras, colapsos más grandes, afectan los cursos de agua locales e influyen en la actividad de las comunidades, provocando desastres y cambios en la configuración geomorfológica del territorio (De Blasio, 2011).

Los deslizamientos son uno de los cinco tipos de movimientos de masa descritos por Cruden y Varnes (1996), y son definidos como movimientos descendentes de una masa de suelo o roca, cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie de falla o de zonas relativamente delgadas con gran deformación cortante. En cuanto a los tipos de deslizamientos son clasificados, según su geometría, en: **a)** deslizamientos rotacionales, donde existe un movimiento a lo largo de una superficie de ruptura curva y cóncava y, **b)** deslizamientos traslacionales en los que el material se desplaza a lo largo de una superficie de ruptura plana u ondular. Aquellos deslizamientos en los cuales se presentan más de un tipo (rotacional - traslacional) o donde se observan otras clases de movimientos de masa se consideran movimientos complejos (Varnes, 1978).

En las cuencas hidrográficas algunos deslizamientos son causados por factores antrópicos, como por ejemplo la presión demográfica que se materializa en cambios de cobertura del suelo y el corte de la pendiente, que afectan la estabilidad de los taludes influenciado por los flujos de agua, sedimentos y contaminantes en los flujos de salida de la cuenca (Bathurst *et al.*, 2010). Ayalew y Yamagishi (2005) determinaron la influencia

de la red vial como un factor detonante en los deslizamientos presentados en las montañas Kakuda-Yahiko en Japón; a su vez, Karsli *et al.* (2009) concluyeron que la pendiente, la rugosidad del terreno, la proximidad a la red vial y la cobertura vegetal juegan un papel importante en la ocurrencia de deslizamientos en Turquía.

Sidle y Ochiai (2006) señalan que los deslizamientos también pueden originarse debido a factores naturales como la geología, las características edáficas, la geomorfología, los factores hidrológicos, la dinámica de la cobertura vegetal y la actividad sísmica del sitio. Glade (2003), Mugagga *et al.* (2012) y Alcántara-Ayala *et al.* (2006) concluyeron que existe una relación entre el cambio de uso del suelo y la ocurrencia de deslizamientos en Nueva Zelanda, Uganda y México respectivamente; otros autores han relacionado la ocurrencia de deslizamientos con las pendientes (Guzzetti *et al.*, 2008; Hadmoko *et al.*, 2009; Sidle y Ochiai, 2006; Sidle *et al.*, 1985; Suárez, 1998; Vergara y Moreno, 1992).

Con el avance de las tecnologías geoespaciales, el estudio de los deslizamientos se realiza en tres dominios de aplicación (Metternicht *et al.*, 2005): mapeo (detección, identificación e inventario); caracterización y monitoreo espacial y temporal (extensión del área, velocidad de movimiento, superficie, topografía y humedad del suelo de diferentes épocas con el fin de evaluar la actividad de deslizamientos). Para cuencas hidrográficas se encuentran los siguientes estudios que emplean estas tecnologías: Hadmoko *et al.* (2009), en la cuenca de Kayangan (Indonesia), emplearon los sistemas de información geográfica (SIG) como herramienta para conocer la distribución espacial de deslizamientos; Guzzetti *et al.* (2008) determinaron, mediante técnicas de fotointerpreta-

ción, la distribución espacial de deslizamientos en la cuenca superior del río Tiber (Italia); Chang y Slaymaker (2002) describieron la frecuencia y distribución espacial de deslizamientos en la cuenca Ho-She (Taiwán).

Según el Instituto Colombiano de Geología y Minería (2002), Ibagué es uno de los municipios con mayor frecuencia de movimientos de masa a escala nacional, ubicándose en el tercer puesto con una participación del 16% (584 eventos) del total ocurrido entre los años 1987 a 2002 en Colombia. El Tolima ocupa el primer lugar con el 54% de los movimientos de masa y presenta cuatro de los grandes eventos ocurridos entre 1987 y 2002; a su vez, gran parte de los movimientos presentados se localizan en el área de la cuenca del río Combeima (Instituto Colombiano de Geología y Minería, 2002).

En la cuenca del río Combeima se reportaron, desde el año 1959, deslizamientos que han ocasionado pérdidas económicas y humanas principalmente en la ciudad de Ibagué, y en los corregimientos de Llanitos, Juntas y Pastales (Vergara y Moreno, 1992). Entre los estudios realizados en el área se destaca el realizado por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (2009a), el cual tuvo dentro de sus objetivos la elaboración de un inventario y cartografía de movimientos de masa, mediante la compilación de información de eventos y la subsecuente recopilación de información en campo. Posteriormente, la Alcaldía de Ibagué y la Corporación Autónoma Regional del Tolima (2012) retomaron el estudio realizado por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (2009a) y actualizaron los deslizamientos mediante reconocimientos en campo, generando cartografía escala 1:10.000. Es de señalar que, en la mayoría de los estudios reportados para la zona, la información sobre deslizamientos

es la más abundante (en comparación con otros movimientos de masa).

Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue analizar la distribución espacial y temporal de los deslizamientos sucedidos en los últimos 16 años en la cuenca hidrográfica del río Combeima (Ibagué-Tolima), y su comportamiento con respecto a variables que promueven su ocurrencia, tales como: geología, pendiente, ubicación en la cuenca y la red vial.

2. Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

La cuenca del río Combeima se localiza entre los 04°19'30" y 04°39'57" de latitud Norte y entre 75°10'11" y 75°23'23" de longitud Oeste sobre el flanco oriental de la cordillera central de los Andes en Colombia (**Figura 1**); posee una extensión aproximada de 27.186 ha (Pérez y Bosque, 2008). Dentro de los aspectos que favorecen la ocurrencia de movimientos de masa en la cuenca se cuentan la composición litológica, la pendiente (entre 30° y 45°), fallamientos, el cambio de uso del suelo y el régimen de precipitaciones (Vergara y Moreno, 1992).

2.2 Datos

Se obtuvieron registros de deslizamientos de tres fuentes de información: **1)** registros de enero de 1999 a diciembre de 2014, a nivel de inventario (reportados por el Servicio Geológico Colombiano - SGC) y como catálogo (reportados por terceros ante el SGC) del Sistema de Información de Movimientos de Masa (SIMMA) (<http://simma.sgc.gov.co/#/public/basic/>), (Servicio Geológico Colombiano, 2014) para el municipio de Ibagué; **2)** cartografía

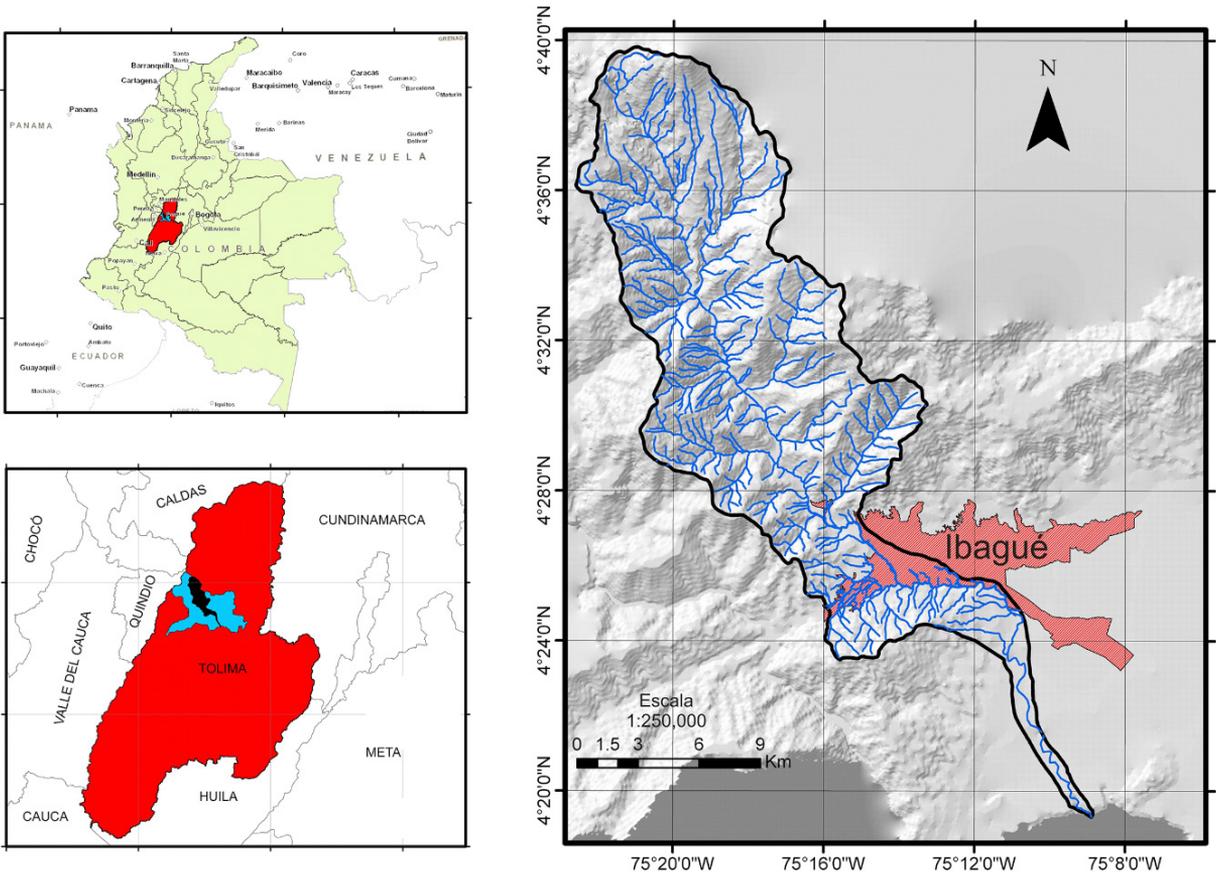


Figura 1 Localización del área de estudio

de movimientos de masa dispuestos en una geodatabase a escala 1:25.000 de la Alcaldía de Ibagué y la Corporación Autónoma Regional del Tolima (2012), 3) interpretación visual de los deslizamientos en las imágenes y su verificación en campo y, 4) localización en campo de nuevos deslizamientos.

Una imagen del satélite *RapidEye* del 2010 y un ortofotomosaico digital del 2009, obtenido a través de servicios *Web Map Server* del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2009). Un modelo de elevación digital, SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), con resolución de 90 m, proporcionado por la NASA a través del portal <http://earthexplorer.usgs.gov/> (United States Geological Survey, 2014).

La cartografía del perímetro de la cuenca se obtuvo del estudio realizado por Pérez y Bosque (2008); para la red vial se utilizó la información cartográfica del 'Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Ibagué' (Alcaldía de Ibagué, 2000) actualizada a partir de un ortofotomosaico digital (IGAC, 2009). La información geológica fue tomada de las planchas 244 y 225 elaboradas por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (2009), escala 1:100.000 y digitalizada por Leal y Lozano (2012). Si bien la información geológica empleada se encuentra a escala general fue imperante usarla, pues no existen otros estudios geológicos a mayor detalle en la zona; además, la geología es uno de los factores con mayor

influencia en la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa (Ayalew y Yamagishi, 2005; Chigira *et al.*, 2011; De Blasio, 2011; Durgin, 1977; Sidle y Ochiai, 2006). La información geográfica fue estructurada bajo el sistema de referencia MAGNA-SIRGAS, coordenadas planas Gauss-Kruger origen Bogotá, EPSG 3116. Para el manejo, análisis y obtención de la cartografía se utilizó GvSIG 1.9 e ILWIS 3.8.

2.3 Método

- Ubicación y homogenización de deslizamientos históricos dentro del área de estudio. A partir del perímetro de la cuenca, se realizó la validación de la posición geográfica de los deslizamientos registrados por las fuentes de información secundaria eliminando aquellos reportes, cuya posición estuviese fuera del área de estudio.
- Interpretación visual de los deslizamientos. Se tuvo en cuenta la resolución espacial en relación con el tamaño de los elementos que caracterizan el deslizamiento, dado por el contraste que se presenta en la imagen (diferencias espectrales que existen entre los deslizamientos identificados y su entorno) y los criterios expuestos por Soeters y Van Westen (1996) para la identificación visual de deslizamientos tanto en la imagen *RapidEye* como ortofotomosaico (Cuadro 1).

Debido a que no existen reportes bibliográficos referentes a la definición de escala en la interpretación visual de deslizamientos sobre las imágenes utilizadas en el estudio, se definieron las escalas máximas de visualización. Para la imagen *RapidEye* fue de 1:5.000 y el ortofotomosaico 1:250 (Figura 2).

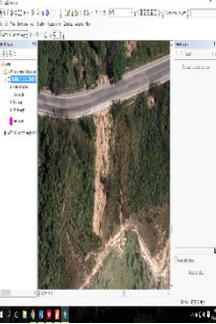
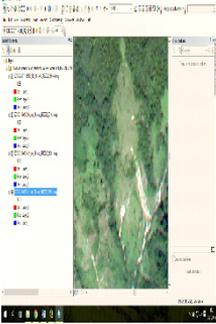
2.3.1 Descripción del tipo y el subtipo de movimiento de masa

Se fundamenta en la interpretación visual de la distribución espacial y temporal de los deslizamientos sobre las imágenes (Cuadro 1). El tipo (deslizamientos) y el subtipo de movimiento registrado (rotacional o traslacional) se soportaron en los criterios de Soeters y Van Westen (1996), quienes asumen la clasificación de Cruden y Varnes (1996) y clasifican los deslizamientos en tipología rotacional o traslacional sin tener en cuenta el material desplazado mediante el uso de imágenes.

2.3.2 Calidad de la información interpretada visualmente

Se evaluó con la Norma Técnica Colombiana – NTC- 5043 (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2002), teniendo en cuenta la calidad de los datos (veracidad de representación de los puntos de deslizamientos registrados) y su exactitud temática (fidelidad de los atributos para cada uno de los deslizamientos). Para la exactitud temática se identificaron puntos localizados en exceso (error de comisión) o aquellos omitidos (error de omisión). Para esto se contó con el apoyo de un profesional en geología quien validó la información temática de los puntos visitados. Se tomó como unidad de muestreo el 25% del total de puntos interpretados visualmente ubicados en la parte media y baja de la cuenca hidrográfica, debido a la facilidad de acceso por la red vial y garantías de seguridad; posteriormente se realizó una visita de campo para validar los atributos asignados. Seguidamente, se estableció una matriz de incertidumbre que relacionó los elementos del universo abstracto elaborado y los elementos determinados en campo, con el fin de obtener porcentajes de cumplimiento en la clasificación de los elementos de calidad señalados.

Cuadro 1 Criterios para la identificación visual de deslizamientos (Soeters y Van Westen, 1996)

| Tipo de movimiento determinado | Sub-tipo de movimiento determinado | Características | Patrón visual Ortofotomosaico y RapidEye |
|--------------------------------|------------------------------------|---|--|
| Deslizamiento | Rotacional | <p>Morfología: Se denotan cambios abruptos en la morfología de la ladera presentándose una depresión o nicho cóncavo y una parte convexa (Lomo de material), coronamiento de tipo lunar o semi-lunar y un sector frontal ovalado. Relación profundidad/ longitud entre 0.1 a 0.3 presentados usualmente en pendientes entre 20 y 40 grados</p> |  <p>Ortofotomosaico</p> |
| | | <p>Vegetación: Fuerte contraste entre la vegetación circundante y la ausencia de vegetación en el área de evento, ausencia de un uso del suelo específico, denotándose la inactividad productiva del sitio</p> <p>Drenaje: Contraste con las laderas circundantes, malas condiciones de drenajes o empozamientos en las zonas cóncavas (nichos), filtraciones en los sectores frontales donde se encuentran los desechos del evento</p> |  <p>RapidEye</p> |
| Deslizamiento | Traslacional | <p>Morfología: Corona controlada por el deslizamiento de la roca, superficie de movimiento planar suave relativamente superficial, usualmente material edáfico sobre la roca madre. Relación profundidad/ longitud menor a 0.1 y amplio ancho, material de arrastre con tamaño decreciente conforme el avance sobre la ladera (a mayor lejanía el tamaño tiende a reducirse)</p> |  <p>Ortofotomosaico</p> |
| | | <p>Vegetación: Denudación de la capa vegetal con una delineación notoria en la dirección de transporte del material, sin uso del suelo presente y con cambios abruptos conforme la vegetación circundante</p> <p>Drenaje: Ausencia de encharcamientos bajo la corona del evento, drenajes desordenados o ausentes, corrientes desviadas por taponamiento con materiales de arrastre producto del evento</p> |  <p>RapidEye</p> |

Fuente: Los autores con base en Soeters y Van Westen (1996)

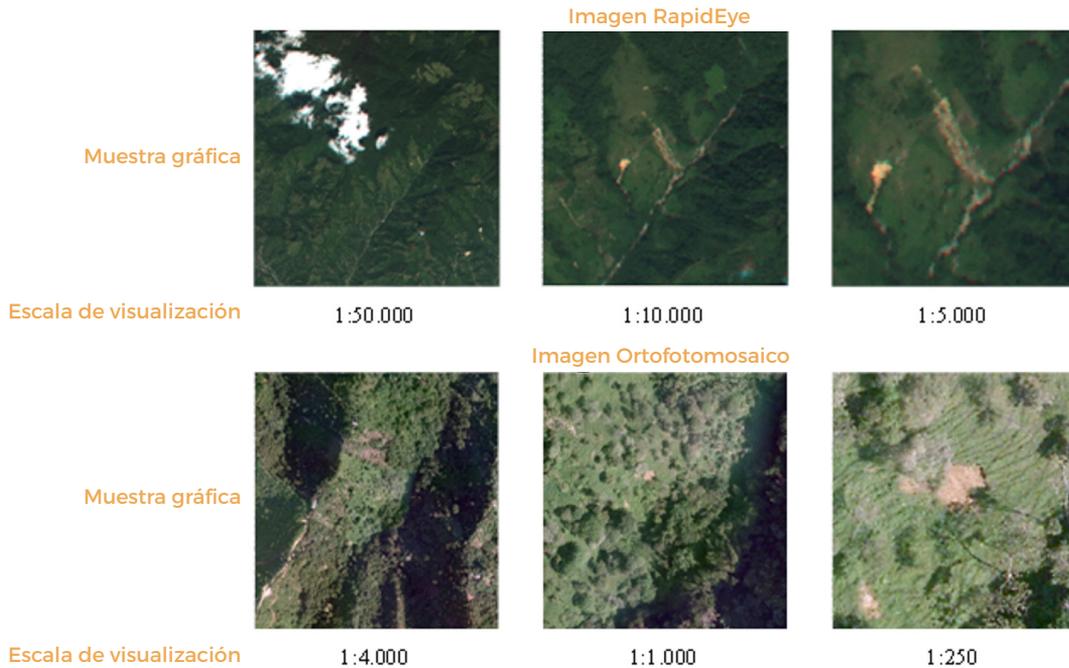


Figura 2 Escalas de interpretación visual de deslizamientos en las imágenes *RapidEye* y ortofotomosaico

2.3.3 Localización en campo de nuevos deslizamientos 2015

Se realizó con apoyo de un profesional en el área de la geología; los nuevos deslizamientos fueron georreferenciados y caracterizados empleando un colector de mano *Trimble Juno SB*, logrando una precisión de posición de 2 a 5 m en tiempo real.

2.3.4 Base de datos geográfica de eventos de deslizamiento

La base de datos se desarrolló bajo un modelo orientado objetos-relacional, fundamentado en la articulación de las bases de datos cartográfica con la base de datos alfanumérico, permitiendo la asociación lógica entre y dentro del componente espacial y tabular de los datos requeridos en el análisis de los deslizamientos. Por lo cual cada una de las entidades se estructuró por su primitiva geometría (**Cuadro 2**).

2.3.5 Determinación de las pendientes de las pendientes

A partir del SRTM se generaron las pendientes en el programa SIG, las que fueron categorizadas (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO, 2009), (**Figura 3**).

2.3.6 Determinación de partes de la cuenca

Se definió como alta, media y baja teniendo la altitud en metros sobre el nivel del mar, en la cual el perfil longitudinal del cauce principal presenta inflexiones notorias, lo que y de acuerdo con el Instituto Colombiano de Geología y Minería, (2009a), corresponde con las cotas 1.500 m donde se localiza el sistema de fallas Otún-Pericos, y 2.000 m correspondiente a la falla El Silencio; estableciendo tres áreas: cuenca alta, por encima de 2.500 msnm, cuen-

Cuadro 2 Atributos de identificación y tipificación de los deslizamientos

| ID | Número identificador del deslizamiento |
|-------------------------|--|
| Fuente de información | Fuente de adquisición de datos del deslizamiento |
| Código | Identificador del deslizamiento de acuerdo a su fuente de información |
| Coordenada Este (X) | Posición geográfica en la ordenada Este bajo proyección espacial EPSG 3116 |
| Coordenada Norte (Y) | Posición geográfica en la ordenada Norte bajo proyección espacial EPSG 3116 |
| País | País en el que se presenta el deslizamiento |
| Departamento | Departamento en el cual se presenta el deslizamiento |
| Municipio | Municipalidad en la cual se presenta el deslizamiento |
| Sitio | Localización del deslizamiento dentro del municipio |
| Tipo de movimiento | Tipología de movimiento de masa de acuerdo a Cruden y Varnes (1996) |
| Sub-tipo de movimiento | Tipología de deslizamiento de acuerdo a Cruden y Varnes (1996) |
| Fecha del deslizamiento | Fecha de realización del estudio y de la fecha de adquisición (toma) de las imágenes respectivamente |

ca media entre 1.500 y 2.500 msnm y cuenca baja, menor a 1.500 msnm.

2.3.7 Distribución de los deslizamientos, geología, partes de la cuenca, influencia de red vial y pendientes

Se realizó una rasterización de los puntos de deslizamientos localizados en la cuenca con una resolución espacial de 30 m; con esta resolución, algunos de los puntos de deslizamientos fueron agrupados considerándolos como una sola área de ocurrencia. Se creó un buffer de 40 m para las vías primarias, secundarias y terciarias localizadas en la cuenca, bajo los criterios de Ayalew y Yamagishi (2005), quienes definieron este valor como adecuado para vías en sectores montañosos. Las áreas de ocurrencia única fueron superpuestas con la información geológica, partes de la cuenca, influencia de la red vial y categorías de pendiente.

3. Resultados

De acuerdo al sistema de clasificación de movimientos planteado por Cruden y Varnes, (1996), se determinó que entre 1999 y 2015 se presentaron 366 deslizamientos, de los cuales 359 corresponden propiamente a deslizamientos y 7 a movimientos complejos donde se evidencian movimientos de masa tipo deslizamiento en combinación con otros movimientos. Del total de deslizamientos determinados (366), 169 fueron catalogados como tipo rotacional, 19 como traslacionales donde la superficie de ruptura coincide y sigue un plano estructural, y 178 deslizamientos no pudieron ser clasificados en tipologías rotacional o traslacional, debido a que dichos registros pertenecían a fuentes secundarias, las cuales no reportaban información de las características del deslizamiento o porque pertenecían a movimientos de tipo complejo, donde no es posible su clasificación como rotacionales o traslacionales. De acuerdo a la interpretación visual realizada sobre las imágenes se

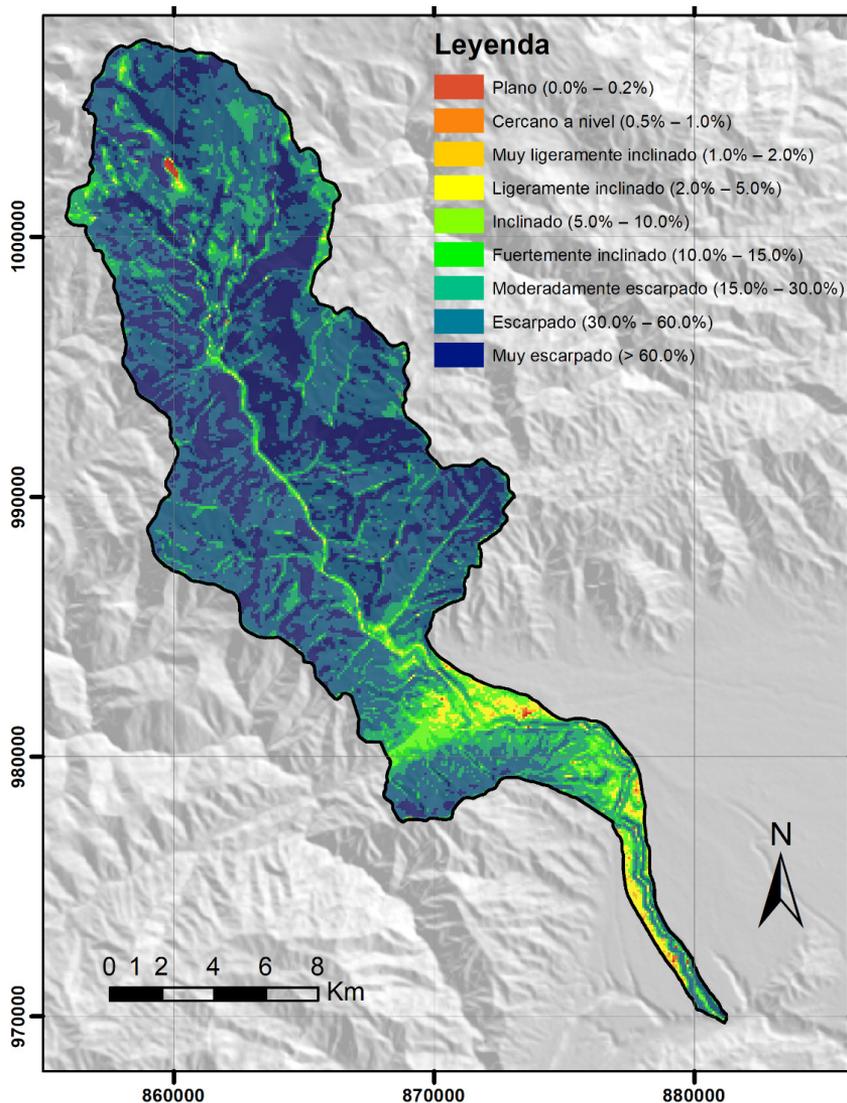


Figura 3 Categorías de pendiente para la cuenca del río Combeima bajo metodología FAO (2009)

encontraron 116 deslizamientos rotacionales y 1 traslacional; a su vez, la identificación en campo de nuevos deslizamientos permitió establecer 23 rotacionales en la zona de estudio, tal cual se expresa en la **Figura 4**.

De acuerdo a la **Figura 5**, los deslizamientos se distribuyeron temporalmente así: entre los años 1999 y 2005 no se encontraron registros de deslizamientos en las fuentes secundarias de información, entre el 2006 y

el 2008 se registraron 18 deslizamientos; en el 2009: 101; entre el 2010 y el 2011: 60; en el 2012: 164 y entre el 2013 y 2015 se registraron 23 deslizamientos. De acuerdo a las fechas de reporte presentadas en la información secundaria adquirida, se encuentra que el 72,5% de los deslizamientos ocurridos en la cuenca sucedieron entre los años 2009 y 2012.

Una vez registrados los deslizamientos, se analizó su distribución en las ocho unidades

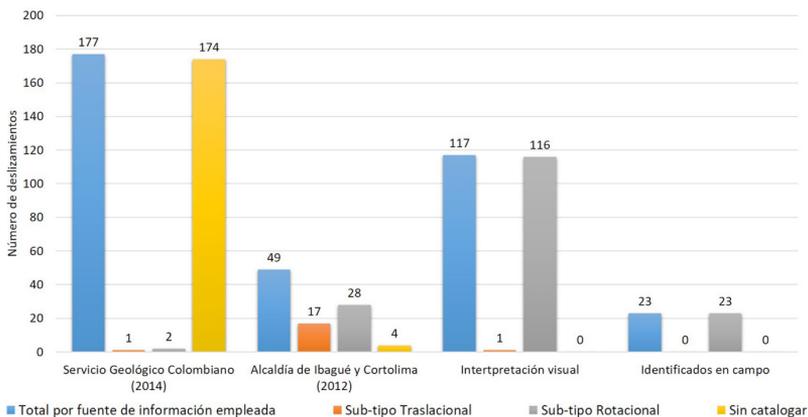


Figura 4 Deslizamientos registrados por fuente de información y subtipo de movimiento

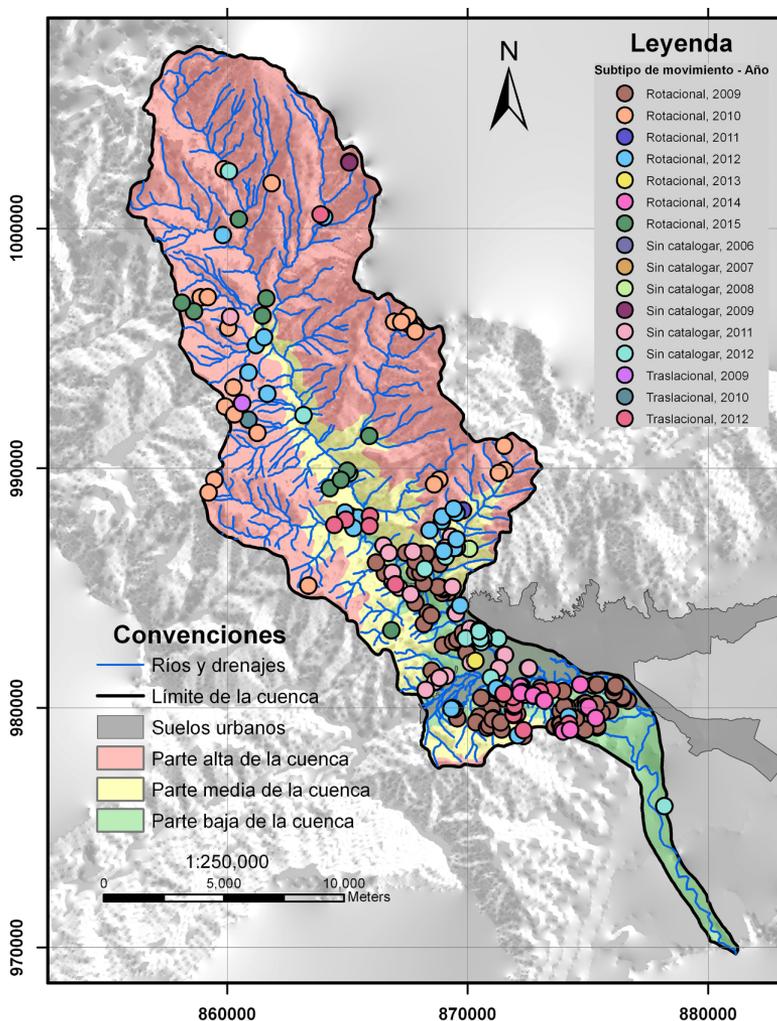


Figura 5 Cartografía de la distribución espacial y temporal de deslizamientos en la cuenca del río Combeima durante el periodo 1999 a 2015. Nota: Entre los años 1999 a 2005 no se reportaron deslizamientos en las fuentes secundarias consultadas

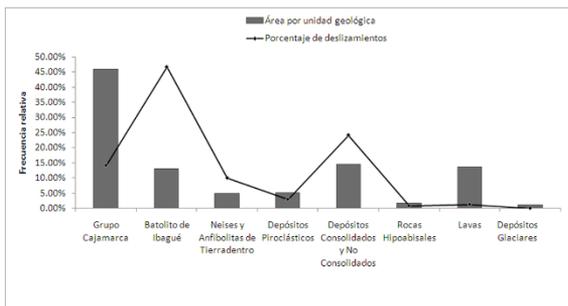
geológicas que cubren la cuenca hidrográfica, encontrándose que el 70,77% se distribuye en dos unidades geológicas: el 46,67% se encuentran sobre El Batolito de Ibagué y el 24,17% en la unidad de Depósitos Consolidados y no Consolidados, el resto están distribuidos en las unidades Grupo Cajamarca, Neises y Anfibolitas de Tierra Adentro, Depósitos Piroclásticos, Rocas Hipoabisales y Depósitos Glaciares; en estas dos últimas unidades, los deslizamientos son casi inexistentes correspondiendo 0,83% y 0%, respectivamente (Figura 6a).

De acuerdo a la distribución de los deslizamientos con respecto a la pendiente, se encontró que el 46,67% se localizan en pendientes escarpadas y el 35,42% en pendientes moderadamente escarpadas; el resto se distribuye en pendientes muy escarpadas e inclinadas

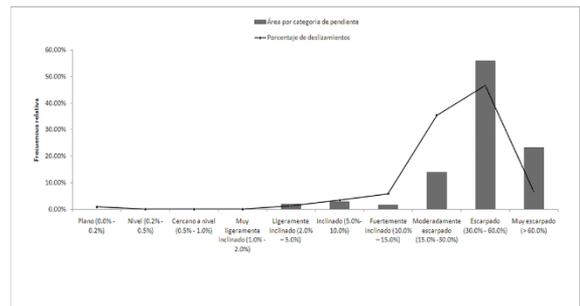
(Figura 6b). Con relación a la localización de los deslizamientos con respecto a las secciones de la cuenca se obtuvo que el 61,25% de los mismos ocurren en la parte baja, mientras que el resto se distribuyó más o menos en forma proporcional en la parte media y alta de la cuenca (Figura 6c). El análisis que se realizó con respecto a la incidencia de la red vial evidenció que las vías no influyen sobre los deslizamientos que se suceden en la cuenca (Figura 6d). La densidad espacial de los deslizamientos fue de 1,34 por km² de la cuenca hidrográfica

En el Cuadro 3 se presentan los resultados de calidad de la interpretación visual realizada tomando como referencia de muestreo el 25% de los deslizamientos interpretados visualmente en las imágenes de satélite (29

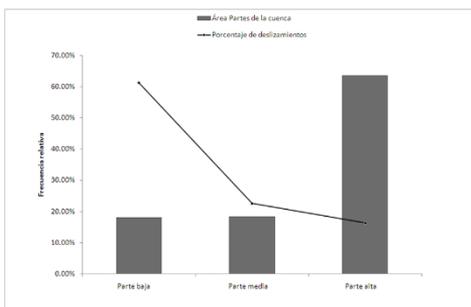
a) Geología



b) Pendientes



c) Partes de la cuenca



d) Influencia vial

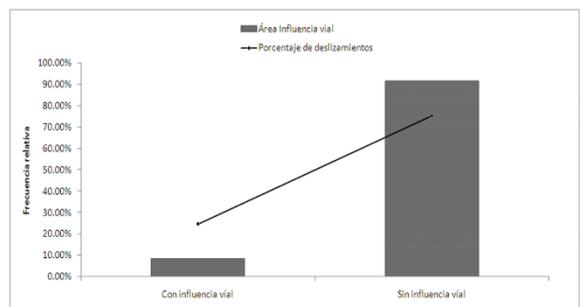


Figura 6 Frecuencia relativa de deslizamientos contra extensión relativa de parámetros geológicos, clases de pendiente, secciones de la cuenca e influencia de la red vial empleados en el estudio

Cuadro 3 Matriz de incertidumbre para prueba de calidad por atributos a deslizamientos interpretados visualmente

| Nombre del elemento | Recurrencia de elementos | Atributo | Atributos | | Error (%) | Exactitud (%) |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------|-----------|---------------|
| | | | Tipo de movimiento de masa | Tipo de deslizamiento | | |
| Puntos de deslizamientos | 26 | Tipo de movimiento de masa | 26 | | 0 | 94.25 |
| | 26 | Tipo de deslizamiento | | 23 | 11.50 | |

deslizamientos de 117 registrados), ya que durante la verificación en campo no fue posible localizar 3 eventos (dadas las condiciones de permisos de acceso, vegetación y similares); solo fue posible contar con 26 de los 29 puntos inicialmente planteados para la validación. Los 26 puntos visitados fueron empleados para contrastar el tipo de movimiento de masa presentado y la tipología de deslizamiento interpretada (rotacional o traslacional).

Los resultados mostraron una asertividad promedio de 94,25% en la categorización de los atributos sobre el tipo de movimiento interpretado y el tipo de deslizamiento registrado; a su vez se obtuvo un error de 16% por comisión de los datos y 0% por omisión de éstos, con lo cual pudo darse por aceptada la validez de ejercicio de interpretación visual realizado.

La distribución espacial y temporal de los deslizamientos de la cuenca hidrográfica del río Combeima se estructuró en una base de datos geográfica, utilizando el enfoque objeto/relacional. En la **Figura 7**, se presenta el diagrama del modelo entidad relación de la base de datos.

4. Discusión

La obtención de la línea base sobre deslizamientos es una herramienta fundamental para la planificación y manejo ambiental de cuencas hidrográficas; con ella es posible determinar el comportamiento histórico de los movimientos y determinar zonas de especial interés para los planificadores del territorio (Glade, 2003). La creación de base de datos de deslizamientos está supeditada a la disponibilidad de información en la zona, si bien los primeros acercamientos realizados por académicos como Soeters y Van Westen (1996), consistieron en la identificación y descripción de los deslizamientos mediante fotografías aéreas y un amplio reconocimiento de campo, actualmente y gracias al avance en las tecnologías de percepción remota, las cuales ofrecen productos con mayores capacidades espectrales y espaciales, se han encaminado múltiples ejercicios para el mapeo y análisis del comportamiento de los deslizamientos a partir de diversas fuentes de información disponibles; gran parte de estos esfuerzos denotan una tendencia a la automatización durante la interpretación de las imágenes y la evaluación del riesgo o incidencia del evento (Glade, 2003; Herrera *et al.*, 2009; Leal y Lozano, 2012; Moss, 2000; Paolini y Sobrino, 2002; Schmidt *et al.*, 2001; Tasseti *et al.*,

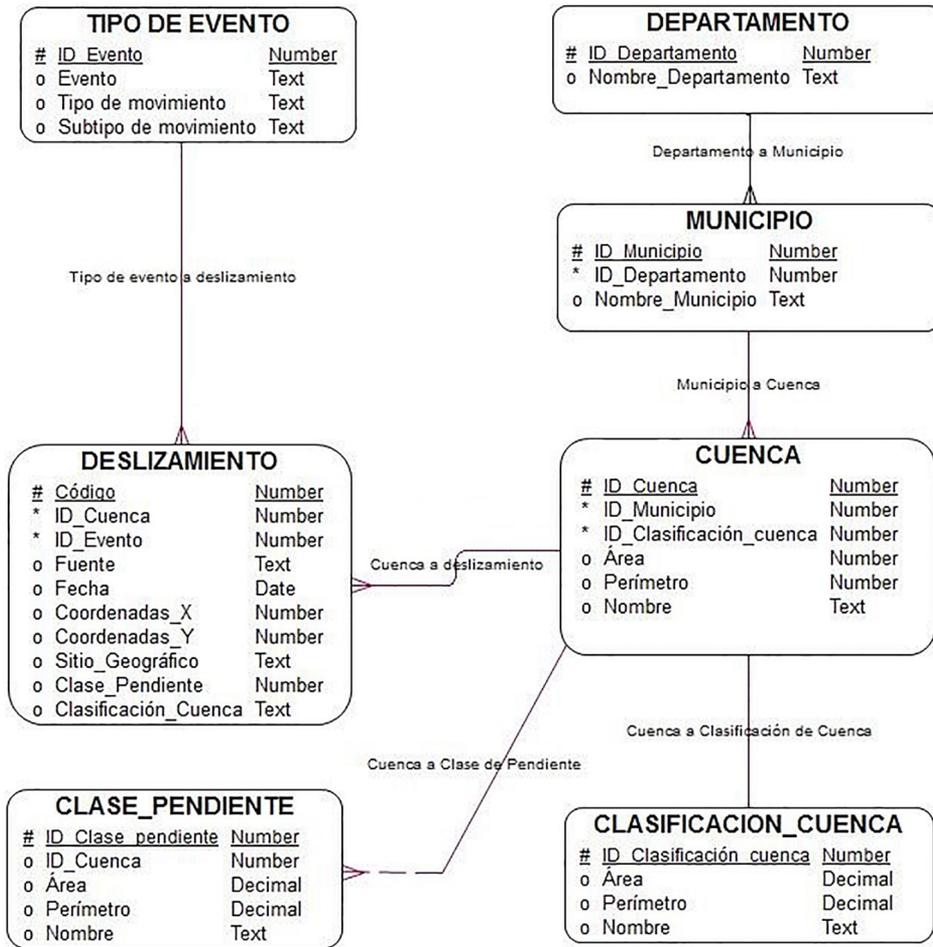


Figura 7 Diagrama del modelo entidad relación de la base de datos geográfica

2008; Yilmaz, 2009). La clasificación visual de sensores remotos sigue teniendo gran importancia durante el ejercicio de reconocimiento y cartografía de los eventos.

Dada la baja formulación de criterios de interpretación visual en imágenes aéreas y satelitales, entre los cuales sobresalen los formulados por Soeters y Van Westen (1996) para la región cafetera en Colombia, éstos aún conservan validez en el reconocimiento visual; sin embargo, es necesario aclarar que dichos criterios permiten identificar fácilmente un evento de deslizamiento, pero a su vez

requieren del apoyo indispensable de recorridos en campo para la determinación específica del subtipo de movimiento que se presenta, pues se puede sobreestimar alguna de las categorías en el análisis visual. El avance de los productos de sensores remotos plantea la posibilidad de actualizar y/o modificar los criterios conforme a las nuevas alternativas en la automatización de los procesos de interpretación de los mismos.

El análisis de la ocurrencia de deslizamientos frente al comportamiento geológico del área de estudio permite establecer que

la mayoría de eventos (46,67%) se presentan en la unidad litológica Batolito de Ibagué y también en las unidades de Depósitos Consolidados y no Consolidados (24,17%) y Grupo Cajamarca (14,17%). Esto demuestra que a pesar de que la unidad Batolito de Ibagué muestra una de las menores extensiones en la cuenca (13% del área total), la misma se encuentra altamente afectada por los eventos de deslizamientos, debido a sus características litológicas (fácilmente erosionable) y ambientales (fuertes pendientes y precipitaciones) que facilitan su meteorización (Chigira *et al.*, 2011; Durgin, 1977). En contraparte, la unidad Grupo Cajamarca, que posee mayor extensión, es afectada en menor proporción al Batolito de Ibagué, lo cual conlleva a pensar que sus propiedades litológicas disminuyen las condiciones para la ocurrencia de estos eventos.

La predominancia de deslizamientos rotacionales sobre los eventos traslacionales registrados en el área puede obedecer inicialmente a la mayor disposición de información para la sección baja de la cuenca, en donde predomina la unidad geológica Batolito de Ibagué; Vergara y Moreno, (1992) aducen que los eventos traslacionales son poco frecuentes en la cuenca y están asociados generalmente a discontinuidades litológicas, principalmente en la unidad Combeima (esquistos grafiticos y cloríticos) y que la generación de eventos traslacionales se encuentra asociada a zonas de deslizamientos rotacionales, lo cual genera zonas de inestabilidad común.

Teóricamente, y como lo plantean diversos autores (Guzzetti *et al.*, 2008; Hadmoko *et al.*, 2009; Sidle y Ochiai, 2006; Sidle *et al.*, 1985; Suárez, 1998), existe una relación directa entre la pendiente y la posibilidad de ocurrencia de deslizamientos, pues a mayor pendiente mayor es la probabilidad de que el evento

sucediera, siendo el rango de pendientes entre 44% - 67% el óptimo para la ocurrencia de los eventos (Guzzetti *et al.*, 2008) y 57,74% - < 100% para el caso específico de la cuenca (Vergara y Moreno, 1992). Esto se corrobora en la cuenca del río Combeima dado que se registra una distribución espacial de los deslizamientos en las categorías de fuertes pendientes (escarpadas y muy escarpadas), siendo las escarpadas (entre 30% y 60%) las de mayor probabilidad de que sucedan eventos (46,67%).

Respecto a la red vial y su posible influencia en la generación de eventos, es claro que en la cuenca, a pesar de contar con una red vial desarrollada, su influencia es baja (8,55% del área de estudio); sin embargo, esta área de influencia vial establecida sufre el 24,70% de los eventos sugiriendo una influencia entre la distancia a la red vial y el desarrollo de los deslizamientos, hecho que fue planteado por autores como Ayalew & Yamagishi (2005) y Hadmoko *et al.* (2009)

La distribución espacial de los deslizamientos que predominan en la sección baja de la cuenca del Combeima (elevaciones menores a 1.500 m) puede obedecerse a múltiples factores, resaltando el impacto que ha tenido el cambio de uso por la población de Ibagué; a su vez, las características de fuertes pendientes, precipitaciones moderadas, densidad de la red vial, suelos francos a franco arenosos de drenaje rápido y material litológico granítico altamente meteorizado y fracturado (Batolito de Ibagué) generan un ambiente ideal para suelos inestables susceptibles a movimientos de masa (Alcaldía de Ibagué y Corporación Autónoma Regional del Tolima, 2012). Aunado a lo anterior esta zona, por su cercanía a la ciudad de Ibagué y a la alta densidad poblacional, posee mayores registros históricos

e información secundaria recopilada sobre eventos de deslizamientos y movimientos de masa.

El análisis temporal de los eventos es otro factor importante a resaltar, si bien esto determina el comportamiento histórico de los deslizamientos en un área dada, para el caso presentado se determinó que, a pesar de las fuentes de información secundarias empleadas, es vital que existan esfuerzos por realizar un monitoreo constante de los eventos, en este aspecto los productos de sensores remotos deben jugar un papel importante para evitar saltos temporales en el registro de la información y propender por el mayor cubrimiento temporal de las zonas.

5. Conclusiones

El presente estudio permitió construir una base de datos geográfica de ocurrencia de deslizamientos provenientes de diferentes fuentes y momentos, facilitando establecer su relación con respecto a factores geológicos, de posición en la cuenca (secciones de la cuenca), clases de pendientes e influencia de la red vial.

La interpretación visual de productos de sensores remotos ópticos permitió la localización e identificación de los tipos y subtipos de deslizamientos, lo que no evita la respectiva corroboración en campo del evento, dado que la asertividad de la clasificación, de acuerdo al subtipo de movimiento, puede verse afectada por las características propias de las imágenes interpretadas y los criterios empleados para su identificación (puede sobreestimarse o subestimarse alguno de los subtipos).

Los deslizamientos registrados permiten establecer que la zona determinada como sección baja de la cuenca (elevaciones menores

a 1.500 m) es la que presenta la mayor frecuencia de deslizamientos, esto debido principalmente a las fuertes pendientes presentadas, al tipo de material litológico (granitos meteorizados), a las características físicas de sus suelos y al fuerte impacto antrópico que la zona tiene por su cercanía a la zona urbana de Ibagué. Si bien existe en general una fuerte predominancia de deslizamientos rotacionales en el área de la cuenca, este valor puede estar sobreestimado debido a que no se realizó un muestreo en campo al 100% de los eventos interpretados visualmente.

La base de datos geográfica construida permitirá continuar estudios para el seguimiento espacio-temporal de los deslizamientos con fines de planificación y manejo ambiental de la cuenca, lo cual plantea la posibilidad de establecer nuevos proyectos encaminados a realizar caracterizaciones morfométricas, evaluar factores de riesgo, estimar factores detonantes y cartografiar características geotécnicas específicas de eventos (áreas, diámetros, longitudes, entre otros) que permitan entender más cabalmente su génesis, desarrollo e impactos tanto ambientales como económicos los mismos que pudiesen generar.

6. Agradecimientos

A la Oficina Central de Investigaciones de la Universidad del Tolima por su apoyo económico para la realización de la investigación. Al profesor Jader Muñoz Ramos por su ayuda en la validación e identificación de los deslizamientos registrados.

7. Referencias citadas

- ALCALDÍA DE IBAGUÉ. 2000. *Plan de ordenamiento territorial para el municipio de Ibagué*. Departamento Administrativo de Planeación - Grupo de Ordenamiento Territorial. Ibagué, Colombia.
- ALCÁNTARA-AYALA, I.; ESTEBAN-CHÁVEZ, O. & J. F. PARROT. 2006. "Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico". *Catena*, 65(2), 152-165.
- AYALEW, L. & H. YAMAGISHI. 2005. "The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan". *Geomorphology*, 65: 15-31.
- BATHURST, J. C.; BOVOLO, C. I. & F. CISNEROS. 2010. "Modelling the effect of forest cover on shallow landslides at the river basin scale". *Ecological Engineering*, 36(3), 317-327.
- CHANG, J. C. & O. SLAYMAKER. 2002. "Frequency and spatial distribution of landslides in a mountainous drainage basin: Western Foothills, Taiwan". *Catena*, 46(1): 285-307.
- CHIGIRA, M.; MOHAMAD, Z.; SIAN, L. C. & I. KOMOO. 2011. "Landslides in weathered granitic rocks in Japan and Malaysia". *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 57(57): 1-6.
- CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DEL TOLIMA y ALCALDÍA DE IBAGUÉ. 2012. *Estudio de amenazas naturales, vulnerabilidad y escenarios de riesgo en los centros poblados de Villa Restrepo, Llanitos, Juntas, Pastales, Pico de Oro, Bocatoma Combeima y Cay por flujos torrenciales en las microcuencas del río Combeima*. Geotec Group. Ibagué, Colombia.
- CRUDEN, D. M. & D. J. VARNES. 1996. "Landslides types and processes". En: K. TURNER & R. SCHUSTER (Eds.), *Landslides: investigation and mitigation*. Special Report 247. pp. 36-75. Transport Research Board. National Academy of Sciences. Washington, DC, USA.
- DE BLASIO, F. V. 2011. *Introduction to the physics of landslides* (1st ed.). Springer Dordrecht Heidelberg. London. New York.
- DURGIN, P. B. 1977. "Landslides and the weathering of granitic rocks". *Geological Society of America*, 3: 127-131.
- GLADE, T. 2003. "Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand". *Catena*, 51(3/4): 297-314.
- GUZZETTI, F.; ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; GALLI, M.; REICHENBACH, P. & M. ROSSI. 2008. "Distribution of landslides in the Upper Tiber River basin, central Italy". *Geomorphology*, 96(1): 105-122.
- HADMOKO, D. S.; SARTOHADI, J.; SAMODRA, G.; CHRISTANTO, N. & F. LAVIGNE. 2009. GIS application for comprehensive spatial landslides analysis in Kayangan Catchment, Menoreh Mountains, Java, Indonesia. *Interna-*

- tional conference - Landslide processes: from geomorphologic mapping to landslide modelling*. 297-302. Strasbourg, France.
- HERRERA, G.; FERNÁNDEZ-MERODO, J. A.; MULAS, J.; PASTOR, M.; LUZI, G. & O. MONSERRAT. 2009. "A landslide forecasting model using ground based SAR data: The Portalet case study". *Engineering Geology*, 105(3/4): 220-230.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA y MINERÍA. 2002. *Catálogo nacional de movimientos en masa*. Subdirección de Amenazas Geoambientales. Bogotá, Colombia.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA y MINERÍA. 2009. *Geología de las planchas 225 Nevado del Ruíz y 244 Ibagué*. Ministerio de Minas y Energía. Bogotá, Colombia.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA y MINERÍA. 2009a. *Zonificación de amenaza por movimientos en masa tipo flujo en la cuenca del río Combeima - Ibagué - Tolima: Unidades geológicas superficiales*. Proyecto Colombia-Suiza de prevención de desastres glacio-volcánicos e hidro-meteorológicos. Bogotá, Colombia.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS y CERTIFICACIÓN (ICONTEC). 2002. *Norma Técnica Colombiana 5043*. Bogotá, Colombia.
- INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI. 2009. *Ortofotomosaicos: IBA-GUE-1_2000-UD-2009*. Subdirección de Geografía y Cartografía. Retrieved. Bogotá, Colombia. Disponible en: <http://bni.gov.co:8080/geoservicios/ortofotomosaicos/wms>. [Consulta: febrero, 2017].
- KARSLI, F.; ATASOY, M.; YALCIN, A.; REIS, S.; DEMIR, O. & C. GOKCEOGLU. 2009. "Effects of land-use changes on landslides in a landslide-prone area (Ardesen, Rize, NE Turkey)". *Environmental Monitoring and Assessment*, 156(1): 241-255.
- LEAL VILLAMIL, J. & L. A. LOZANO BOTACHE. 2012. "Potential fragility levels for erosion and landslides in soils of Ibagué municipality (Tolima)". *Revista de Investigación Agraria y Ambiental RIAA*, 3 (1): 67-76. Disponible en <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4227172>. [Consulta: agosto, 2017].
- METTERNICHT, G.; HURNI, L. & R. GOGU. 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: 284-303.
- MOSS, J. L. 2000. "Using the Global Positioning System to monitor dynamic ground deformation networks on potentially active landslides". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(1): 24-32.
- MUGAGGA, F.; KAKEMBO, V. & M. BUYINZA. 2012. "Catena land use changes on the slopes of Mount Elgon and the implications for the occurrence of landslides". *Catena*, 90: 39-46.

- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN y LA AGRICULTURA (FAO). 2009. *Guía para la descripción de suelos* (4th ed.). Roma, Italia. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>. [Consulta: marzo, 2017].
- PAOLINI, L. y J. A. SOBRINO. 2002. “Detección de deslizamientos de ladera mediante imágenes Landsat TM: el impacto de estos disturbios sobre los bosques subtropicales del noroeste de Argentina”. *Revista de Teledetección*, 18(1): 21-27.
- PÉREZ GÓMEZ, U. y J. BOSQUE SENDRA. 2008. “Transiciones de la cobertura y uso de la tierra en el período 1991 - 2005 en la cuenca del río Combeima, Colombia”. *Serie Geográfica*, 14(1): 163-178.
- SCHMIDT, K. M.; ROERING, J. J.; STOCK, J. D.; DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. & T. SCHAUB. 2001. “The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range”. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5): 995-1.024.
- SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO. 2014. *Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA)*. Disponible en: <http://simma.sgc.gov.co/#/public/basic/>. [Consulta: febrero, 2017].
- SIDLE, R.; PEARSE, A. & C. L. O'LOUGHLIN. 1985. *Hillslope stability and land use* (1st ed.). American Geophysical Union. Washington, DC, USA.
- SIDLE, R. & H. OCHIAI. 2006. *Landslides: processes, prediction, and land use* (1st ed., Vol. 18). American Geophysical Union. Washington, DC, USA.
- SOETERS, R. & C. J. VAN WESTEN. 1996. Slope instability recognition, analysis and zonation. En: A. K TURNER & R. L. SCHUSTER (Eds.), *Landslides: investigation and mitigation*. Special Report 247, pp. 129-177. Transportation Research Board. National Academy of Sciences. Washington, DC, USA.
- SUÁREZ DÍAZ, J. 1998. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales* (1st ed.). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Bucaramanga, Colombia.
- TASSETTI, N.; BERNARDINI, A. & E. S. MALINVERNI. 2008. “Use of remote sensing data and GIS technology for assessment of landslide hazards in Susa Valley, Italy”. *EARSeL eProceedings*, 7(1): 59-67.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. 2014. *Modelo de Elevación Digital STRM - 1 Arc-second*. Disponible en: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. [Consulta: febrero 22, 2017]
- VARNES, D. J. 1978. “Slope movement types and processes”. En: R. L. SCHUSTER & R. J. KRIZEK (Eds.), Special Report, 176, *Landslides—Analysis and control*. pp. 11-33. National Academy of Sciences Transportation Research Board. Washington, DC, USA.

- VERGARA, H. y M. MORENO. 1992. *Estudio geológico geotécnico de la cuenca del río Combeima*. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Gobernación del Tolima-CRET. Ibagué (Tolima), Colombia.
- YILMAZ, I. 2009. "Landslide susceptibility mapping using frequency ratio, logistic regression, artificial neural networks and their comparison: A case study from Kat landslides (Tokat-Turkey)". *Computers & Geosciences*, 35(6): 1.125-1.138.