

## **INVENTARIO Y ANÁLISIS DE MOVIMIENTOS DE LADERA EN LOS DEPARTAMENTOS DE CUNDINAMARCA Y META (COLOMBIA)**

**Martha Liseth CASTELLANOS ORDÓÑEZ (1), María Camila HERRERA COY (2) Iván L. HERRERA PÉREZ (3), Viviana MEDINA DÍAZ (4), Mario SÁNCHEZ GOMEZ (5,7), Jorge DELGADO GARCÍA (6), Tomás FERNÁNDEZ DEL CASTILLO (6,7)**

(1) Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca  
ml.castellanos@outlook.com

(2) Máster en Ingeniería Geomática y Geoinformación  
Universidad de Jaén  
mhc0009@red.ujaen.es

(3) Grupo de Investigaciones Geográficas para el Desarrollo Territorial  
Facultad de Ciencias Ambientales y de la Sostenibilidad  
Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales  
iherrera@udca.edu.co

(4) Warco SAS - Geobruigg  
vmedina.ud@gmail.com

(5) Departamento de Geología  
Universidad de Jaén  
msgomez@ujaen.es

(6) Grupo de Sistemas Fotogramétricos y Topométricos  
Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría  
Universidad de Jaén  
jdelgado@ujaen.es; tfernán@ujaen.es

(7) Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energías y Medio Ambiente  
Universidad de Jaén

### **RESUMEN**

*En este trabajo se presentan los estudios realizados sobre movimientos en masa en cuatro áreas de los departamentos de Cundinamarca y Meta, en Colombia. En todas ellas se ha realizado un inventario de movimientos y un análisis de los factores que los determinan. El inventario muestra un elevado número de movimientos (835, 212, 252 y 2506), con una distribución en la que predominan los deslizamientos y flujos, y en menor medida los colapsos-avalanchas y procesos de reptación. Los factores determinantes más importantes son: la elevación, que a su vez condiciona unas precipitaciones, en general elevadas, con medias anuales entre 1000 y 5000 mm; la pendiente, apareciendo los movimientos en relación con áreas de pendiente media, entre 20° y 30°; la litología, con movimientos preferentemente originados en lutitas, así como en arenitas de edad cretácica; los usos del suelo, estando los movimientos en relación con áreas de menor cobertura vegetal como las agrícolas, los pastos y páramos.*

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los deslizamientos de ladera se consideran uno de los riesgos naturales más importantes a nivel mundial, causando miles de víctimas al año y costes por valor de miles de millones de euros (Schuster, 1996; Petley, 2012; UNDRR, 2019). En comparación con otros fenómenos de riesgo como los terremotos o las inundaciones, el efecto de los deslizamientos es más difuso y continuo en el espacio y el tiempo, por lo que según algunas estimaciones su impacto está subestimado (Petley, 2012). A pesar de ello, ocasionan daños relevantes en infraestructuras, propiedades y el propio medio, así como la interrupción de la actividad socioeconómica (Schuster, 1996; Guzzetti et al., 1999).

Una de las medidas más eficaces para la prevención y mitigación de los riesgos es su evaluación, que de acuerdo a la formulación clásica de Varnes (1984), comprende tanto la peligrosidad o probabilidad de que un fenómeno potencialmente dañino ocurra en un espacio y tiempo determinado, como la exposición y vulnerabilidad de los elementos en riesgo. El primer paso de estos análisis es la realización de inventarios o bases de datos que recojan la localización espacial, la datación temporal y los atributos temáticos de los movimientos (Chacón et al., 2006; Guzzetti et al., 2012). Para ello se emplean la observación directa, las técnicas geomáticas de captura de datos y los ensayos in situ o en laboratorio de las distintas propiedades del terreno (Chacón et al., 2006; Fell et al., 2008).

En Colombia, la ocurrencia de fenómenos de riesgo, entre los que destacan los movimientos en masa, sismos y erupciones volcánicas, es muy frecuente, debido a su ubicación geográfica en la cordillera andina, con una orografía muy acusada, una gran complejidad geológica (interacción de tres placas tectónicas) y una destacada variabilidad climática. De acuerdo con la información existente en el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA), del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2022), desde 1900 hasta la fecha, en el país se han reportado 135.632 movimientos en masa. Debido a éstos, 31.631 personas han perdido la vida y 68.792 familias se han visto dañadas. Por su parte, el inventario internacional DesInventar (UNDRR, 2022), reporta 10.559 incidencias y 7400 muertos para Colombia. Entre las regiones más afectadas, en términos absolutos, se encuentran los departamentos de Cundinamarca, Boyacá y Norte de Santander, al centro y norte del país, en la Cordillera Oriental; así como Cauca, al sur, en el Macizo Colombiano. Otros departamentos de menor extensión, como Caldas, Risaralda o Quindío, en la Cordillera Central; o Atlántico en la Sierra de Santa Marta, presentan también una densidad considerable en términos relativos (SGC, 2022).

En este trabajo, se han considerado algunas áreas muy activas dentro de los departamentos de Cundinamarca y Meta, en el sector centro de la Cordillera Oriental. Así, se estima que estos departamentos se encuentran enfrentados a probabilidades medias y altas de ocurrencia de fenómenos catastróficos, particularmente de deslizamientos, provocados entre otras causas por la alta intervención antrópica a las laderas con el consecuente deterioro de las cuencas hidrográficas y sus condiciones de estabilidad. En concreto, la Subdirección de Ingeniería Geoambiental de Ingeominas (hoy Subdirección de Geoamenazas del SGC) priorizó seis regiones con una mayor concentración de fenómenos: la cuenca del río Guavio, el área en torno a la carretera de Bogotá-Villavicencio, la vertiente oriental del río Negro, la cuenca del río Sumapaz, la cuenca media del río Bogotá y el municipio de San Cayetano (CORPES 1998).

El objetivo de este trabajo es presentar un inventario detallado y un análisis de factores determinantes de la inestabilidad en cuatro áreas de los departamentos de Cundinamarca y Meta: área del río Negro (Quebradanegra, Gualivá), cuenca del Guavio y carretera de Bogotá-Villavicencio, como áreas piloto para la caracterización de este fenómeno en la Cordillera Oriental Andina, en Colombia.

## **2. AREAS DE ESTUDIO**

Las áreas de estudio se encuentran en el sector centro de la Cordillera Oriental Andina (Figura 1), una cadena montañosa que se extiende por cerca de 1000 km desde el sur de Colombia (Macizo Colombiano, donde se bifurca la cordillera en sus tres ramas, Occidental, Central y Oriental) hasta

la frontera con Venezuela al norte (Sierra Nevada del Cocuy), donde se alcanzan las mayores altitudes, en torno a 5400 m. Al oeste de la Cordillera se sitúa el altiplano cundiboyacense, donde se enclava la capital Bogotá (Figura 1) y muchas otras poblaciones; desde ahí se desciende hasta el río Magdalena, que discurre entre las cordilleras Oriental y Central; al este, se extienden las cuencas de los ríos Orinoco y Amazonas. En este sector de la Cordillera central, las altitudes oscilan entre unos cientos de metros en las cuencas de los ríos hasta 4000 m en las cumbres. La geología de la Cordillera Central en el sector estudiado corresponde fundamentalmente a depósitos marinos, pero también transicionales a continentales, de edad entre el Cretácico y Paleoceno (Chicangana and Kramer, 2013; SGC, 2019). A ambos lados de la cordillera, en el valle del río Magdalena y las cuencas del Amazonas y Orinoco se disponen depósitos terciarios de carácter sedimentario o volcánoclastico; y sobre todos ellos aparecen materiales cuaternarios: aluviales, coluviales y rellenos paludales. La estructura consiste en fallas inversas de bajo ángulo o cabalgamientos y pliegues, que hacen aflorar en algunos casos materiales metamórficos del sustrato paleozoico (Ordovícico y Devónico), sin llegar aquí al basamento cristalino proterozoico.

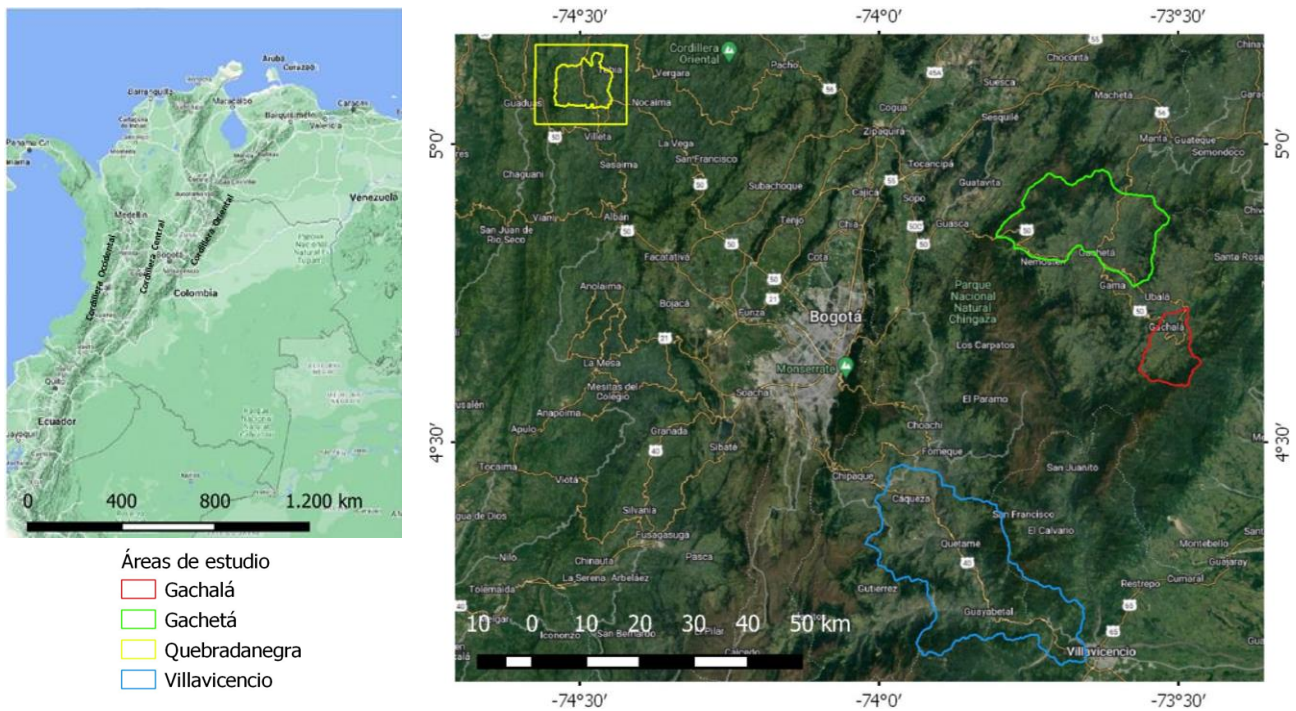


Figura 1. Localización del área de estudio (coordenadas y escala).

## 2.1. Quebradanegra (Gualivá)

Esta área de 148 km<sup>2</sup> está centrada en el municipio de Quebradanegra, en la provincia de Gualivá, situado a unos 60 km al noroeste de Bogotá (Figura 1), aunque también se extiende por los municipios de Útica al norte y Villeta al sur. El municipio de Quebradanegra presenta una extensión de 83 km<sup>2</sup> y una población de 4453 habitantes, correspondiendo el 74% a zonas rurales; cuenta con un casco urbano y dos centros poblados, La Magdalena y La Milagrosa (DANE, 2019). Las comunicaciones se restringen a algunos tramos de la carretera Bogotá-Honda (ruta 50) al sur, la carretera secundaria Villeta-Útica, y otras vías de menor importancia. Las precipitaciones son muy elevadas, entre 1500 y 2000 mm (IDEAM, 2015a). Desde el punto de vista geológico (Tabla 1), en esta área afloran mayoritariamente series de materiales cretácicos, correspondientes al grupo Villeta, que comienzan con arenitas de ambiente transicional y pasan posteriormente a lutitas oscuras de ambiente marino todas ellas de edad Cretácico inferior. En la parte oeste afloran lutitas y rocas silíceas “chert” del Cretácico superior (Grupo Olini) hasta el Paleógeno donde afloran arenitas y lutitas. La estructura la conforman una serie de cabalgamientos y pliegues de dirección media NNE-SSW (Acosta y Ulloa, 2001). La actividad de los deslizamientos es muy elevada, concretamente en el municipio de Quebradanegra se registran 218 incidencias (el máximo del país), aunque también hay un número alto en Útica (27) y Villeta (10).

## 2.2. Gachetá (Guavio)

El área presenta una extensión de 248 km<sup>2</sup>, abarcando los municipios de Gachetá (predominante) y Guatavita en el departamento de Cundinamarca, a unos 50 km al este de Bogotá (Figura 1). El municipio de Gachetá cuenta con 8203 habitantes y el de Guatavita con 6148 habitantes, con una población rural del 60 y 64%, respectivamente (DANE, 2019). Las comunicaciones se restringen a algunos tramos de la ruta 50 que enlaza el embalse del Guavio con Bogotá y algunas carreteras de orden menor. Las altitudes varían entre 1600 m en el cauce del río Guavio hasta 3600 m en el norte del área. Las precipitaciones medias anuales varían entre 1000 mm en la zona baja del valle del río Guavio hasta más de 3000 mm en las zonas más elevadas (IDEAM, 2015a). Desde el punto de vista geológico, en esta área afloran series de materiales cretácicos (Tabla 1), que comienzan con formaciones de conglomerados y arenitas de ambiente transicional, a las que siguen lutitas de origen marino (Cretácico inferior); sobre ellas se sitúan secuencias de lutitas y arenitas marinas y transicionales del Cretácico superior, que se coronan con lutitas y areniscas continentales del Paleógeno (Corredor y Terraza, 2015). La estructura la conforma una serie de cabalgamientos y pliegues de dirección media NNE-SSW, que hacen aparecer los términos más modernos hacia el oeste, y los más antiguos hacia el este y los núcleos de los pliegues. En el municipio de Gachetá, la actividad de los deslizamientos presenta un total de 4 incidencias.

| Edad               | Formación                                | Materiales               | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------------------|--|--------------------------|---|---|---|---|
| Cuaternario        |  | Aluviales y coluviales   | X | X | X | X |
| Neógeno            |  | Areniscas y gravas       |   | X |   |   |
| Paleógeno          | Bogotá, Cacho                            | Cuarzoarenitas, lutitas  | X | X |   |   |
| Cretácico superior | Guaduas, Grupo Guadalupe, Chipaque       | Arenitas y lutitas       | X | X |   | X |
| Cretácico inferior | Grupo Villeta (Une, Fomeque, Trincheras) | Lutitas y arenitas       | X | X | X | X |
|                    | Grupo Caqueza (Ubalá, Macanal), Útica    | Arenitas y lutitas       | X | X | X | X |
|                    | Santa Rosa                               | Conglomerados y arenitas |   |   | X | X |
| Devónico-Carbon.   | Farallones                               | Cuarzoarenitas           |   |   | X | X |
| Ordovícico         | Grupo Quetame                            | Filitas y cuarcitas      |   |   |   | X |

Tabla 1. Unidades geológicas de las zonas de estudio. 1: Quebradanegra; 2: Gachetá; 3: Gachalá; 4: Villavicencio.

## 2.3. Gachalá (Guavio)

El área presenta una extensión de 100 km<sup>2</sup>, dentro del municipio de Gachalá en el departamento de Cundinamarca (Figura 1), a unos 65 km al este de Bogotá (135 km por carretera). El municipio de Gachalá cuenta con 4378 habitantes, habitando el 61% de la población en zonas rurales (DANE, 2019). Las comunicaciones se restringen a una carretera parcialmente asfaltada que circunvala a la represa del Guavio. Las altitudes varían entre 1500 m en el embalse hasta 3500 m en el sur de la zona. Las precipitaciones medias anuales varían entre 2000 mm en el oeste hasta 3400 mm en el este (IDEAM, 2015a). Desde el punto de vista geológico, afloran dos grandes unidades estructurales (Tabla 1): los materiales del sustrato paleozoico y las series sedimentarias cretácicas. Dentro de las primeras, aparecen cuarzoarenitas y lutitas de edad Devónico-Carbonífero, que afloran sobre todo al sureste de la zona a favor de contactos mecánicos y plegamiento (Terraza et al., 2013). Los materiales cretácicos corresponden a conglomerados y arenas de ambiente transicional, que pasan a lutitas de ambiente marino, predominantes en la zona. La estructura consiste en una serie de cabalgamientos y pliegues de dirección media NNE-SSW. En el municipio la actividad de los deslizamientos se restringe a 2 incidencias.

## 2.4. Carretera Bogotá-Villavicencio

Es el área con una mayor extensión, de unos 746 km<sup>2</sup>, a lo largo de la ruta 40 entre Bogotá y Villavicencio (Figura 1), localidad situada a 75 km al sureste de la capital (120 km por la carretera). La zona se extiende por los municipios de Cáqueza, Fosca, Quetame y Guayabetal de la provincia de Oriente en el departamento de Cundinamarca, y el municipio de Villavicencio en el departamento de Meta. Hidrográficamente corresponde a la cuenca del río Negro, subsidiario de

la cuenca del Orinoco. Los municipios cuentan con un número total de habitantes y porcentaje de población rural de: Cáqueza, 15.594 habitantes y 58%; Fosca, 5578 habitantes y 75%; Quetame, 4929 habitantes y 77%; Guayabetal, 5809 habitantes y 70%; y Villavicencio, 451.212 habitantes, de los que el 93% es población del casco urbano (DANE, 2019). La vía entre Bogotá y Villavicencio vertebrada toda la zona, y junto a ella hay otras carreteras de orden menor. Las altitudes varían entre 600 m en las inmediaciones de Villavicencio hasta 3500 m en la sierra al este de Quetame. Las precipitaciones medias anuales varían entre 500 mm en el sector oeste hasta más de 3000 mm en el sector de Villavicencio. Desde el punto de vista geológico (Tabla 1), en esta área afloran materiales del sustrato paleozoico y las series sedimentarias cretácicas (Pulido y Gómez, 2001). Dentro del Paleozoico aparecen a su vez dos conjuntos: rocas metamórficas de bajo grado, cuarcitas y filitas, de edad Ordovícico; sobre ellas, se sitúan de forma discordante cuarzarenitas y lutitas, de edad Devónico-Carbonífero. En las series cretácicas hay un pequeño afloramiento de conglomerados y arenas de ambiente transicional en la base de la serie, que pasan a lutitas de ambiente marino, predominantes en la zona. La estructura es de cabalgamientos y pliegues de dirección media NNE-SSW, que permiten el afloramiento de las formaciones paleozoicas infrayacentes a las series cretácicas. En los municipios de la zona la actividad de los deslizamientos es muy elevada: Cáqueza presenta 169 incidencias; Quetame, 22 incidencias; Guayabetal, 9 incidencias; y Villavicencio, 94 incidencias.

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

La metodología comprende en primer lugar la elaboración de inventarios de movimientos de ladera en cada una de las zonas de estudio; y en segundo lugar, el análisis de factores determinantes de los movimientos.

#### **3.1. Inventario de movimientos de ladera**

Los inventarios o bases de datos de movimientos se han realizado mediante fotointerpretación y digitalización a partir de imágenes. Además, se utiliza como apoyo la base de datos del Sistema de Información de Movimientos en Masa de Colombia, SIMMA (SGC, 2022).

En el área de Quebradanegra se han empleado las imágenes correspondientes a un vuelo análogo pancromático de 1998 a escala 1:40,000 y varios vuelos digitales a color de 2011, 2012 y 2014 de resolución 30 cm, todos ellos del IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). Como apoyo se han empleado imágenes PlanetScope, Sentinel y Terra Aster. A partir de éstas imágenes se realizó la orientación de los bloques fotogramétricos, la elaboración de ortomosaicos, la generación de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) y la restitución 3D de los movimientos identificados, utilizando las herramientas correspondientes del software Socet Set 5.5. La restitución de los movimientos en ambos vuelos (análogo y digital), se llevó a cabo mediante las herramientas de digitalización y edición del citado software y la visión estereoscópica en la estación fotogramétrica digital. Los dos inventarios se integraron en un sistema de información geográfica (ArcGIS) en un único inventario multitemporal, en el que se registra la tipología (Varnes, 1978), actividad y grado de desarrollo. La tipología se establece por interpretación de la morfología 3D y la actividad a partir de los rasgos observados, pero también mediante la comparación de los MDE a través del cálculo de modelos de diferencias.

En las zonas del Guavio, el material empleado han sido los ortofotomosaicos a color, accesibles a través del servidor WMS del IGAC. La escala de referencia es 1:10000, y la fecha de 2011 en la zona de Gachetá y de 2015 en la zona de Gachalá. La interpretación de los movimientos se realiza mediante la visualización 2D de las ortofotografías en ArcGIS, la digitalización de los polígonos, y la introducción y cálculo de atributos (tipología, según Varnes, 1978; y área de los movimientos). Para la interpretación se ha contado con el apoyo de las imágenes de fondo de Google Earth Pro (Landsat y Sentinel-2) y las vistas pseudo-3D que ofrece este software. El resultado son los inventarios o bases de datos integradas en el sistema de información geográfica.

En el caso de la carretera de Bogotá-Villavicencio, el material empleado son las imágenes de fondo de Google Maps y Bing Maps. La fotointerpretación 2D se ha llevado a cabo mediante la conexión a través de WMS de dichas imágenes desde el software de código abierto QGIS. La digitalización de los polígonos de los movimientos de ladera identificados y la introducción y cálculo de atributos (tipología, según Varnes, 1978; actividad, según, WP/WLI, 1993; y área de los movimientos) se ha llevado igualmente con este software. No obstante, como en los casos anteriores, la fotointerpretación se ha apoyado en las vistas pseudo-3D de las imágenes de fondo de Google Earth (tanto de resolución media, Landsat y Sentinel, como de alta resolución, Pleiades y Maxar, disponibles ya en el momento de realizar el inventario). El resultado es igualmente un inventario integrado en el SIG.

### **3.2. Análisis de factores determinantes**

Para el análisis de factores determinantes, se requiere previamente la cartografía de los mismos, además del propio inventario de movimientos de ladera. Las cartografías de factores o datos para realizarlas han sido obtenidos de distintas fuentes de información geográfica oficiales de Colombia.

En el área de Quebradanegra, se ha empleado la geología disponible en el SGC, concretamente la información vectorial correspondiente de la plancha 208 a escala 1:100.000 (Acosta y Ulloa, 2001); además de las unidades litológicas (Figura 2a), se pueden derivar la distancia a fallas y las relaciones geométricas entre la estratificación y la superficie del terreno. Por otra parte, se han considerado la geomorfología de escala 1:100.000 (SGC, 2018); los suelos, disponibles para el departamento de Cundinamarca a escala 1:100.000 (IGAC, 2000); y la cobertura de la Tierra a escala 1:100.000 (IDEAM, 2015b). Las distancias a los ríos y carreteras se han obtenido mediante el análisis de distancias a partir de las entidades lineales de las capas del mapa topográfico del IGAC. Finalmente, se han obtenido en el SIG los modelos derivados del MDE (Figura 3a): altitud, pendiente, orientación y curvatura del terreno. El MDE se ha obtenido a partir de la orientación del vuelo fotogramétrico digital del IGAC de fecha 2011-2014 y su posterior generación con el software Socet Set, con resolución 5 m. También se ha generado un MDE a partir del vuelo análogo de 1998.

En las áreas del Guavio, Gachetá y Gachalá, los factores que se han utilizado son la geología (Figura 2b y 2c), concretamente la información vectorial de la litología en las planchas 228 y 229 a escala 1:100.000 (Corredor y Terraza, 2015; Terraza et al., 2013). Por otra parte, se han considerado la geomorfología y el paisaje (para Gachetá), igualmente de escala 1:100.000 (SGC, 2015); los suelos del departamento de Cundinamarca a escala 1:100.000 (IGAC, 2000a); la cobertura de la Tierra a escala 1:100.000 (IGAC, 2018); y las precipitaciones (IDEAM, 2015b). Finalmente, en el SIG se han obtenido los modelos derivados del MDE (Figura 3b y 3c), que son la altitud, pendiente, orientación y curvatura del terreno, mediante funciones de análisis y reclasificación. El MDE utilizado es el modelo interferométrico ALOS PALSAR de los años 2011 y 2015, con resolución de 12,5 m.

En el área de la carretera de Bogotá-Villavicencio, en primer lugar se ha empleado la geología, que en este caso procede del Atlas Geológico de Colombia (SGC, 2015), disponible como información vectorial, de la que se han extraído las unidades litológicas (Figura 2d). Por otra parte, se han utilizado imágenes de Sentinel-2, a partir las cuales se ha obtenido el índice NDVI y una clasificación de la cubierta (usos) del suelo mediante el método Maximum Likelihood usando el software SAGA. También se ha utilizado el mapa de precipitaciones medias (IDEAM, 2015b). Finalmente, en el SIG se han obtenido los modelos derivados del MDE (Figura 3d), que en este caso son el mapa de intervalos de altitud por reclasificación del MDE, así como la pendiente, orientación, curvatura del terreno, índice de posición topográfica (TPI) y el índice de rugosidad del terreno (RTI), mediante funciones de análisis y reclasificación. El MDE utilizado es un modelo interferométrico de ALOS PALSAR de 2011, con resolución espacial de 12,5 m.

El análisis factorial ha consistido en la tabulación cruzada entre los mapas de factores determinantes y los inventarios de movimientos, globales y/o por tipologías, con el cálculo del coeficiente de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para estimar la correlación entre factores y movimientos.

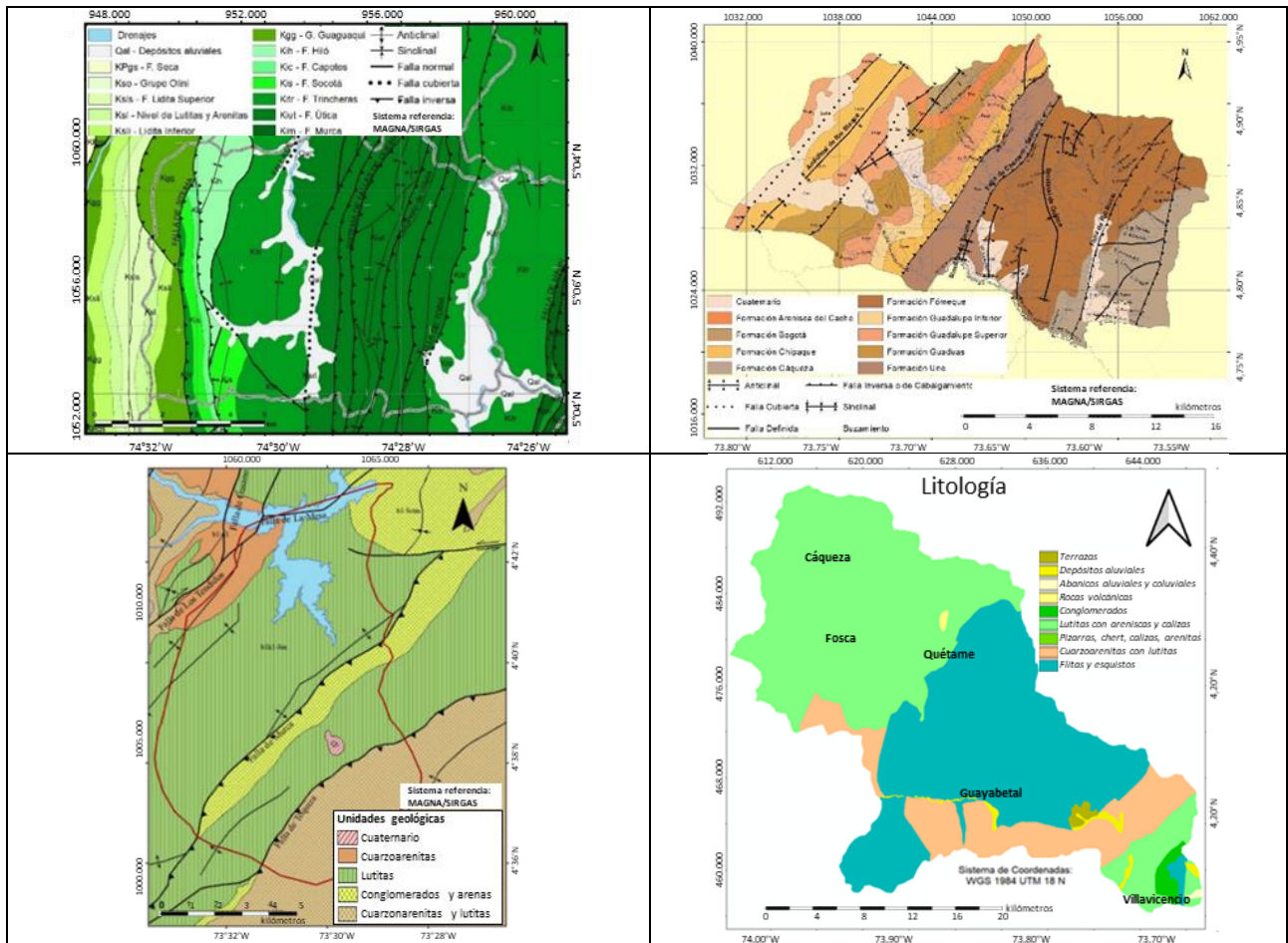


Figura 2. Unidades geológicas (litología): a: Quebradanegra; b: Gachetá; c: Gachalá; d: Villavicencio-Bogotá.

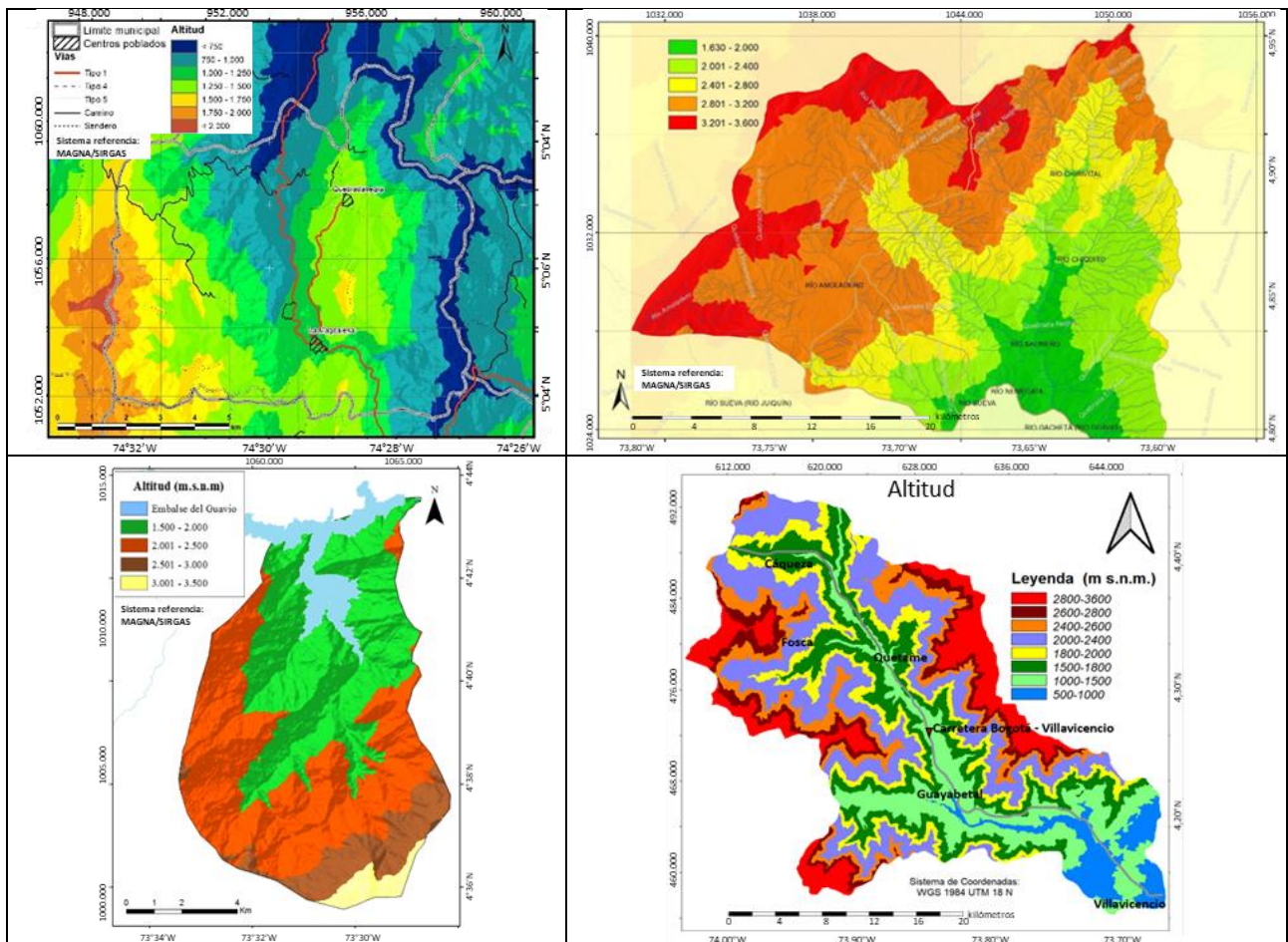


Figura 3. Modelo digital de elevaciones a: Quebradanegra; b: Gachetá; c: Gachalá; d: Villavicencio-Bogotá.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Inventarios de movimientos de ladera

El inventario de Quebradanegra muestra un total de 767 movimientos, con tamaños que varían entre 23 y 530.000 m<sup>2</sup>, y un tamaño promedio de 14.200 m<sup>2</sup>. Los movimientos más extendidos son los deslizamientos (60%), así como los flujos de tierras y derrubios (36%); en menor proporción se han inventariado desprendimientos y avalanchas, procesos de reptación y movimientos complejos. Desde el punto de vista de la actividad, buena parte de los movimientos se catalogan como interrumpidos, latentes y relictos; en menor medida aparecen abandonados y reactivados (WP/WLI, 1993). En total, los movimientos se extienden aproximadamente por un 7,65% de la zona. En el área de Gachetá, el inventario muestra un total de 212 movimientos, siendo mayoría los deslizamientos (41%), seguidos de los flujos (36%), los procesos de reptación (15%) y las avalanchas (8%). En el área de Gachalá se cartografiaron 252 eventos, de los que el 87% corresponden a deslizamientos.

El inventario de Villavicencio-Bogotá muestra un total de 2506 movimientos, que representan un 8,13% de la zona de estudio, con tamaños que varían entre 122 y 1.369.000 m<sup>2</sup>, siendo el promedio de 24.200 m<sup>2</sup>. Los movimientos predominantes en número son las avalanchas, los flujos de derrubios, y después los deslizamientos, flujos de tierras y procesos de reptación; sin embargo, en área, los que ocupan mayor extensión son claramente los deslizamientos (64%). Desde el punto de vista de la actividad, la mayor parte se catalogan como activos (57%), latentes (28%) y relictos (15%); aunque las avalanchas y flujos de derrubios son mayoritariamente activos, mientras que los deslizamientos y flujos de tierras son sobre todo relictos y los procesos de reptación latentes.

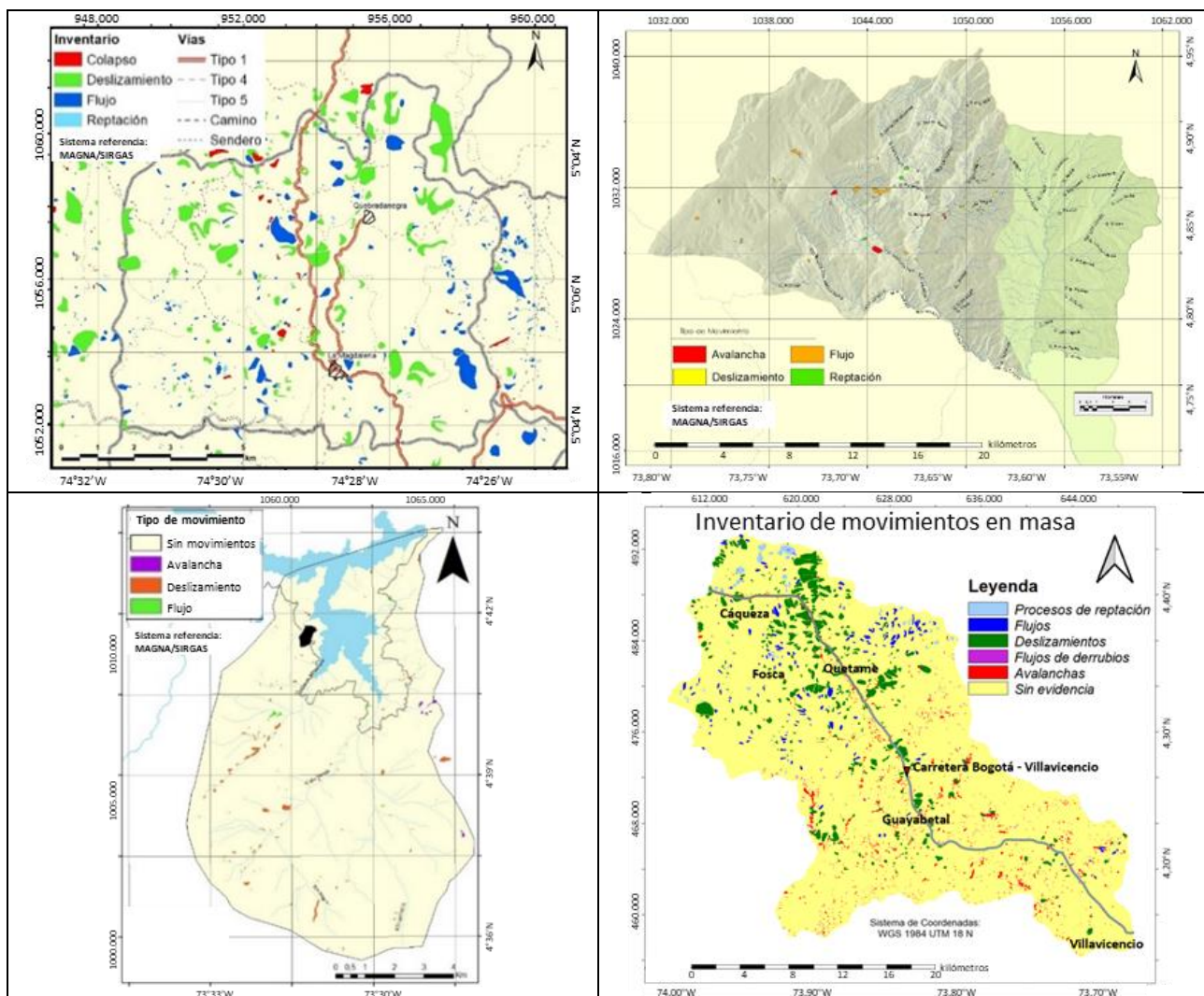


Figura 4. Inventario de movimientos: a: Quebradanegra; b: Gachetá; c: Gachalá; d: Villavicencio-Bogotá.



| Área/Zona        | Quebradanegra |    |             |                    | Gachetá |    | Gachalá |    |                    | Villavicencio-Bogotá |    |             |                    |
|------------------|---------------|----|-------------|--------------------|---------|----|---------|----|--------------------|----------------------|----|-------------|--------------------|
|                  | Nº            | %N | %A          | A(m <sup>2</sup> ) | Nº      | %N | Nº      | %N | A(m <sup>2</sup> ) | Nº                   | %N | %A          | A(m <sup>2</sup> ) |
| Avalanchas       | 60            | 8  | 2           | -                  | 17      | 8  | 13      | 5  | 4333               | 979                  | 39 | 13          | 8123               |
| Fluj. derrubios  | -             | -  | -           | -                  | -       | -  | -       | -  | -                  | 866                  | 35 | 4           | 2649               |
| Deslizamientos   | 200           | 26 | 60          | -                  | 87      | 41 | 219     | 87 | 2489               | 437                  | 17 | 64          | 89261              |
| Flujos de tierra | 492           | 64 | 36          | -                  | 76      | 36 | 20      | 8  | 3945               | 179                  | 7  | 12          | 41747              |
| Reptación        | 15            | 2  | 2           | -                  | 32      | 15 | -       | -  | -                  | 45                   | 2  | 7           | 88803              |
| Total            | 767           | -  | <b>7,65</b> | 14200              | 212     | -  | 252     | -  | -                  | 2506                 | -  | <b>8,13</b> | 24231              |

Tabla 2. Datos sobre el inventario. Nº: Número; %N: % en número respecto al total; %A: % en área respecto al total; A(m<sup>2</sup>): Área media individual. En negrita (para totales): % movimientos respecto al área de la zona.

## 4.2. Análisis de factores determinantes

En la zona de Quebradanegra, los factores que más determinan la inestabilidad son las pendientes (superiores a 30°) seguidas de la litología (formaciones de arenitas) y las unidades geomorfológicas (sierras). En la zona de Gachetá, los movimientos se extienden por las distintas unidades geológicas (arenitas y lutitas), de pendientes entre 20-45° en avalanchas y 10-30° en deslizamientos y flujos, mayoritariamente en partes bajas cóncavas de las laderas y barrancos de morfologías montañosas.

| Área de Quebradanegra: Todos los movimientos |                  |  |                                     |  |
|--|------------------|--|-------------------------------------|--|
| Movimientos                                  |                  |  |                                     |  |
| Factores                                     | K-S              | Condiciones  |                                     |  |
| Geología                                     | 0,13             | Arenitas Kb, Lutitas Ki  |                                     |  |
| Dist. Fallas                                 | 0,03             | -  |                                     |  |
| Estructura                                   | 0,11             | Overdip  |                                     |  |
| Geomorfología                                | 0,13             | Sierras homoclinales y anticlinales, pendientes laterales de sierras |                                     |  |
| Suelos                                       | 0,11             | -  |                                     |  |
| Dist. Ríos                                   | 0,11             | 200-800 m  |                                     |  |
| Cubierta                                     | 0,08             | Bosque, vegetación arbustiva, pastos y agrícola                      |                                     |  |
| Dist. Carreteras                             | 0,10             | > 200 m  |                                     |  |
| Elevación                                    | 0,11             | 500-2000 m, especialmente 750-1250 m                                 |                                     |  |
| Pendiente                                    | 0,23             | > 45° (23%), 30-45°  |                                     |  |
| Orientación                                  | 0,09             | S y O, preferentemente   |                                     |  |
| Curvatura                                    | 0,03             | -  |                                     |  |
| Área de Gachetá                              |                  |  |                                     |  |
| Movimientos                                  | Avalanchas       | Deslizamientos   | Flujos                              |  |
| Factores                                     | Condiciones      | Condiciones  | Condiciones                         |  |
| Geología                                     | Arenitas Ki y Ks | Lutitas Ki, arenitas Ki  | Arenitas Ki y Ks, lutitas Ki        |  |
| Geomorfología                                | -                | -  | -                                   |  |
| Suelos                                       | -                | -  | -                                   |  |
| Cubierta                                     | Praderas         | Praderas   | Praderas y cultivos, bosques        |  |
| Elevaciones                                  | 1600-2400 m      | 1600-2400 m  | 2000-3200 m                         |  |
| Pendientes                                   | 20-45°           | 10-30°   | 10-30°                              |  |
| Orientaciones                                | -                | -  | -                                   |  |
| Curvatura                                    | -                | Zonas medias-bajas   | Zonas medias                        |  |
| Precipitación                                | 1500-2000 mm     | 1500-2000 mm   | 1500-2000 mm                        |  |
| Área de Gachalá                              |                  |  |                                     |  |
| Movimientos                                  | Tod.             | Avalanchas   | Deslizamientos                      | Flujos   |
| Factores                                     | K-S              | Condiciones  | Condiciones                         | Condiciones                                    |
| Geología                                     | 0,09             | Arenitas DC  | Lutitas Ki, arenitas Kb             | Lutitas Ki, arenitas Kb                        |
| Suelos                                       | 0,09             | Udorthents, Melanudands  | Dystrudepts, Argiudolls, Hapludands | Udorthents, Hapludolls, Eutrudepts Melanudands |
| Cubierta                                     | 0,05             | Agrícolas  | Pastos y agrícolas                  | Agrícolas y pastos                             |
| Elevaciones                                  | 0,15             | 1500-2000 m  | 1500-2500 m                         | 1500-2000 m                                    |
| Pendientes                                   | 0,04             | >30°   | 10-30°                              | 5-20°  |
| Orientación                                  | 0,22             | -  | S y SE                              | -  |
| Curvatura                                    |                  | Bajas-cóncavas   | Bajas-cóncavas                      | Medias-planas                                  |
| Precipitaciones                              | 0,14             | >3000 mm   | 2000-3000 m                         | < 2000 mm                                      |

Tabla 3. Análisis de factores. Geología Ki, Ks: Cretácico inferior y superior. K-S: Coeficiente de Kolmogorov-Smirnov.

| Zona de carretera Villavicencio-Bogotá |                |                                    |            |                        |                         |                        |
|--|----------------|------------------------------------|------------|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Movimientos                            | Todos          |                                    | Avalanchas |                        | Corrientes de derrubios |                        |
| Factores                               | K-S            | Condiciones                        | K-S        | Condiciones            | K-S                     | Condiciones            |
| Geología                               | 0,23           | Lutitas Ki                         | 0,28       | Arenitas DC, filitas O | 0,42                    | Arenitas DC, filitas O |
| Cubierta                               | 0,25           | Antr., cultivos, prados            | 0,29       | Antrópico              | 0,17                    | Antrópico, bosques     |
| Elevaciones                            | 0,18           | 1000-2000 m                        | 0,32       | 1000-1500 m            | 0,14                    | 1000-1500 m            |
| Pendientes                             | 0,03           | -                                  | 0,19       | > 30°                  | 0,27                    | > 30°                  |
| Orientación                            | 0,04           | -                                  | 0,05       | -                      | 0,14                    | E-SE                   |
| Curvatura                              | 0,04           | -                                  | 0,49       | Cóncavas y convexas    | 0,05                    | -                      |
| Posición topog.                        | 0,12           | Zonas bajas                        | 0,33       | Zonas bajas            | 0,09                    | Zonas medias-bajas     |
| Rugosidad                              | 0,03           | -                                  | 0,19       | Alta                   | 0,27                    | Alta                   |
| Precipitaciones                        | 0,21           | 500-1000 mm                        | 0,22       | 2000-3000 mm           | 0,27                    | 3000-5000 mm           |
| NDVI                                   | 0,10           | -                                  | 0,25       | 0,1-0,25               | 0,14                    | 0-0,25                 |
| Movimientos                            | Deslizamientos |                                    | Flujos     |                        | Reptación               |                        |
| Factores                               | K-S            | Condiciones                        | K-S        | Condiciones            | K-S                     | Condiciones            |
| Geología                               | 0,31           | Lutitas Ki, arenitas Kb, filitas O | 0,48       | Lutitas Ki             | 0,54                    | Lutitas Ki             |
| Cubierta                               | 0,27           | Antr., cultivos, prados            | 0,32       | Prados, cultivos       | 0,36                    | Cultivos, prados       |
| Elevaciones                            | 0,29           | 1500-1800 m                        | 0,25       | 2000-2800 m            | 0,34                    | 2000-2800 m            |
| Pendientes                             | 0,05           | 20-30°                             | 0,20       | 10-20°                 | 0,38                    | 5-10°                  |
| Orientación                            | 0,06           | -                                  | 0,08       | -                      | 0,24                    | S                      |
| Curvatura                              | 0,03           | -                                  | 0,03       | -                      | 0,21                    | Cóncavo-plano          |
| Posición topog.                        | 0,10           | Zonas medias-bajas                 | 0,15       | Zonas medias           | 0,18                    | Zonas medias           |
| Rugosidad                              | 0,06           | -                                  | 0,19       | Baja                   | 0,38                    | Baja                   |
| Precipitaciones                        | 0,33           | 500-1000 mm                        | 0,41       | 500-2000 mm            | 0,59                    | 500-2000 mm            |
| NDVI                                   | 0,10           | 0,25-0,50                          | 0,09       | -                      | 0,08                    | -                      |

Tabla 3 (cont.). Análisis de factores. Geología Ki, Ks: Cretácico inferior y superior. O: Ordovícico; D-C: Devón.-Carb.

En la zona de Gachalá, los factores que muestran mayor correlación son la altitud (1500-2500 m), las precipitaciones (superiores a 2500 mm), la orientación (S y E); en cuanto a la litología, los deslizamientos se presentan más en las formaciones de arenitas que en las lutitas, mientras los flujos aparecen en formaciones lutíticas y las avalanchas en las arenitas paleozoicas. En el área de Villavicencio-Bogotá, los factores más importantes son la litología (lutitas), los usos del suelo (antrópico, cultivos y prados), la altitud (1000-2000 m), las precipitaciones (500-1000 mm o bien 3000-5000 mm); y TPI (zonas bajas cóncavas). Si se considera el análisis por tipologías, los coeficientes de correlación aumentan en general en factores como la litología e incluso llegan a ser significativos en otros factores como las pendientes. Así, tanto las avalanchas como las corrientes de derrubios presentan mayores porcentajes en las cuarzoarenitas y en las filitas del Paleozoico, mientras que los deslizamientos, flujos y reptación lo hacen en las lutitas cretácicas. Respecto a las pendientes, las avalanchas y corrientes de derrubios se producen en pendientes superiores a 30°, los deslizamientos en pendientes de 20-30°, los flujos en 10-20° y los procesos de reptación en 0-10°.

## 5. DISCUSIÓN

Se han estudiado cuatro áreas del sector central de la Cordillera Oriental de los Andes de Colombia, dentro de un ambiente geológico y ambiental similar. La geología consiste en series sedimentarias cretácicas con predominio de lutitas y arenitas, estructuradas según cabalgamientos y pliegues de dirección SSW-NNE, a favor de los cuales afloran materiales del sustrato paleozoico, con cierto grado de metamorfismo. Presentan unas altitudes mayoritariamente entre 1000 y 3000 m, con pendientes bastante elevadas (intervalo modal entre 20 y 30°), precipitaciones generalmente superiores a 1000-1500 mm, y usos del suelo de tipo agrícola, pastos y bosques.

Los inventarios muestran unas pautas comunes, a pesar de haber sido realizados por distintos investigadores y con distintos niveles de detalle, llegando a alcanzar un número de 3765 movimientos, que en las áreas de mayor detalle suponen un porcentaje cercano al 8% de la superficie. Hay un predominio de movimientos de tipo deslizamiento y flujo de tierras, aunque también aparecen

avalanchas o colapsos, corrientes de derrubios y procesos de reptación, lo que coincide en líneas generales con otros estudios de la cordillera, más al norte (Valencia y Martínez-Graña, 2018). Donde se ha catalogado la actividad, los movimientos de tamaño más reducido, como las corrientes de derrubios, avalanchas y pequeños deslizamientos, presentan una mayor actividad; frente a deslizamientos, flujos, y procesos de reptación que presentan una actividad menor, como sucede en otras regiones del mundo donde se ha analizado este tipo de análisis (Fernández et al., 2021).

Se han analizado diversos factores, relacionados con la geología (litología, estructura y fallas, suelos y geomorfología), la cubierta o usos del suelo, índices de vegetación y los derivados del modelo digital de elevaciones (altitud, pendiente, orientaciones, curvatura, posición en la ladera y rugosidad). Dentro de ellos, la litología y la pendiente juegan un papel importante como se establece en los trabajos clásicos (Aleotti and Chowdury, 1999), aunque el resto de factores comúnmente utilizados en la actualidad, incluyendo los nuevos derivados del MDE (Reichenbach et al., 2018) también determinan la inestabilidad en las distintas áreas.

Las litologías dominantes de las series cretácicas, lutitas y arenitas, están presentes en la mayor parte de los movimientos, especialmente los deslizamientos, flujos de tierras y procesos de reptación, sin que se pueda establecer de forma clara si la composición más lutítica o más arenítica de las formaciones condiciona la generación de los movimientos o su tipología (deslizamientos o flujos de tierras). La inestabilidad de estos materiales, así como otros de edad Néogeno y Cuaternario ha sido establecida en otras regiones de la Cordillera Oriental (Ramos et al., 2016; Valencia y Martínez-Graña, 2018; García-Delgado, 2020; Pradhan et al., 2019). Sin embargo, los procesos de reptación sí se producen casi exclusivamente en lutitas; mientras que las avalanchas y las corrientes de derrubios se asocian en mayor medida a materiales paleozoicos, tanto las cuarzoarenitas del Devónico, como a las filitas y cuarcitas del Ordovícico, lo que está de acuerdo con otros estudios (Valencia y Martínez-Graña, 2018). Otros factores geológicos, como la estructura, tampoco muestran relaciones claras, al igual que la cubierta del suelo, aunque la mayoría de los movimientos se asocian a zonas con vegetación escasa, praderas o cultivos, y en menor medida a zonas de bosque, como apuntan algunos estudios regionales (Grima et al., 2020).

Por lo que respecta a los factores topográficos y otros, los movimientos se asocian a zonas de sierra, en las que la pendiente actúa como factor determinante diferencial entre las distintas tipologías, de tal manera que las avalanchas y corrientes de derrubios se producen mayoritariamente en pendientes superiores a 30°, los deslizamientos en pendientes entre 20 y 30°, los flujos de tierras en 10-20° y los procesos de reptación en 5-10°. En general las avalanchas aparecen en zonas cóncavas y convexas de alta rugosidad, las corrientes de derrubios en zonas plano-cóncavas de alta rugosidad, los flujos de tierras y reptación en las zonas medias de las laderas, de baja rugosidad, y los deslizamientos no se asocian a ninguna de ellas. En cada área, los movimientos se producen en determinados intervalos de altitud, aunque son muy variables de unas a otras, lo mismo que sucede con las precipitaciones o la orientación, por lo que la influencia de estos factores no se puede establecer de forma directa.

## **6. CONCLUSIONES**

El presente estudio ha permitido una caracterización de los movimientos de ladera en un sector de la Cordillera Oriental de los Andes colombianos, a través de la realización de inventarios mediante fotointerpretación y el análisis SIG de factores. En unas áreas de extensión entre 100 y 750 km<sup>2</sup>, se han inventariado cerca de 3800 movimientos, que suponen un porcentaje cercano al 8% del área en las zonas de mayor detalle. Las tipologías predominantes en cuanto a extensión son los deslizamientos y flujos de tierras, incluyendo procesos de reptación, que se asocian preferentemente a las series sedimentarias del Cretácico, constituidas por lutitas y arenitas, en zonas de sierra, con pendientes medias (10-30°). Con menor extensión relativa, pero en un número muy elevado, aparecen avalanchas y corrientes de derrubios, en relación con las litologías anteriores, pero también con los materiales más o menos metamórficos del zócalo paleozoico, tanto cuarzoarenitas como filitas, especialmente en zonas de fuertes pendientes (superiores a 30°) y alta rugosidad de las zonas bajas de las laderas.

## REFERENCIAS

- Acosta, J. E. and Ulloa, C. E., 2001. Geología de la plancha 208 Villeta. Memoria explicativa. Ingeominas.
- Aleotti, P. and Chowdhury, R., 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 58: 21–44.
- Chacón, J., Irigaray, C., Fernández, T. and El Hamdouni, R., 2006. Engineering geology maps: Landslides and Geographical Information Systems (GIS). *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 65: 341–411.
- Chicangana, G. and Kammer, A., 2013. Evolución tectónica de la cordillera oriental de Colombia. Desde la apertura del océano Iapeto hasta la conformación de la Pangea: una visión preliminar. Primera parte: Aspectos geológicos. *Geología Colombiana*, Vol. 38. Bogotá, Colombia. pp. 65-74.
- CORPES, 1998. Mapa de amenazas geológicas por remoción en masa y erosión del Departamento de Cundinamarca. Ingeominas, Bogotá.
- Corredor, V.E. and Terraza, R., 2015. Geología plancha 228 Bogotá Noreste. Memoria explicativa Ingeominas.
- DANE (2019). Censo Nacional de Población y Vivienda 2018. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda-2018>.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. and Savage, W.Z., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Eng. Geol.*, 102: 85–98.
- Fernández, T., Pérez, J.L., et al. 2021. Multitemporal landslide inventory and activity analysis by means of aerial photogrammetry and LiDAR techniques in an area of Southern Spain. *Remote Sens.*, 13: 2110.
- García-Delgado, H., 2020. The San Eduardo Landslide (Eastern Cordillera of Colombia): Reactivation of a deep-seated gravitational slope deformation. *Landslides*, 17: 1951–1964.
- Grima, N., Edwards, D., Edwards, F., Petley, D. and Fisher, B., 2020. Landslides in the Andes: Forests can provide cost-effective landslide regulation services. *Science of the Total Environment*, 745: 141128.
- Guzzetti, F., Cesare, A., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., Chang, K., 2012. Earth-science reviews landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth Sci. Rev.*, 112: 42–66.
- IDEAM, 2015a. Atlas Climatológico de Colombia: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>.
- IDEAM, 2015b. Coberturas de la tierra. Período 2010 – 2012. Escala 1:100.000.
- IGAC, 1988. Mapa de suelos de Cundinamarca a escala 1:100.000.
- IGAC, 2000. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca.
- IGAC, 2016. Mapa geomorfológico de Colombia a escala 1:100.000.
- IGAC, 2018. Mapa de cobertura de la Tierra. Adaptación del Corine Landcover. Escala 1:100.000.
- Petley, D., 2012. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40: 927–930.
- Pradhan, A.M.S., Lee, J.M. and Kim, Y.T., 2019. Semi-quantitative method to identify the vulnerable areas in terms of building aggregation for probable landslide runout at the regional scale: a case study from Soacha Province, Colombia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78: 5745–5762.
- Pulido, O. and Gómez, L.S., 2001. Geología plancha 266 Villavicencio. Memoria explicativa. Ingeominas.
- Ramos, A.M., Prada, L.F., Trujillo, M.G., Macías, J.P., Santos, A.C., 2016. Linear discriminant analysis to describe the relationship between rainfall and landslides in Bogotá, Colombia. *Landslides*, 13: 671–681.
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B., Mihri, M. and Guzzetti, F., 2018. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth Sci. Rev.*, 180: 60–91.
- Schuster, R.L., 1996. Socioeconomic significance of landslides. In *Landslides: Investigation and Mitigation*; Turner, A.K., Schuster, R.L., Eds; Transp. Res. Board Sp. Report 247; Nat. Ac. Sciences: Washington, DC, USA; 12–35.
- SGC, 2015. Atlas Geológico de Colombia 2015. [https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/agc\\_500K2015.aspx](https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/agc_500K2015.aspx)
- SGC, 2018. Mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa escala 1:100.000. Plancha 208 – Villeta.
- SGC, 2019. Mapa geológico de Colombia. <https://www2.sgc.gov.co/MGC/Paginas/mgc2M2019.aspx#>.
- SGC, 2022. SIMMA, Sistema de Información de Movimientos en Masa. <https://simma.sgc.gov.co/#/>.
- Terraza, R., Montoya, D.M., Reyes, G.A., Fuquen, J.A., Torres, E., López, M.C., Guevara, N. and Álvaro, J., 2013. Geología de la plancha 229 Gachalá. Memoria explicativa. Ingeominas.
- UNDRR, 2019. Global Annual Report, 2019. <https://gar.undrr.org/report-2019>.
- UNDRR, 2022. DesInventar SENDAI. <https://db.desinventar.org/>.
- Valencia, J.A. and Martínez-Graña, A.M., 2018. A neural network model applied to landslide susceptibility analysis (Capitanejo, Colombia), *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9, 1: 1106 1128.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement, types and processes. In *Landslides: Analysis and Control*, Schuster, R.L., Krizek, R.J., Eds., Transp. Res. Board Sp. Rep. 176; Nat. Ac. Sciences: Washington, DC, USA; 12-33.
- Varnes, D.J., 1984. *Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice*, Natural Hazards; UNESCO: Paris, France.
- WP/WLI, 1993. A suggested method for describing activity of a landslide. *Bull.Eng.Geol.Env*, 47, 53-57.