



Universidad de Jaén
Centro de Estudios de Postgrado

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS DE LADERA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO MURCA, VERTIENTE AL EMBALSE DEL RÍO GUAVIO, COLOMBIA.

Alumna: Medina Díaz, Viviana

Tutores: Mario Sánchez Gómez
Tomás Fernández del Castillo

Dpto: Geología
Ingeniería Cartográfica, Geodésica y
Fotogrametría

Universidad de Jaén

Centro de Estudios de Postgrado

ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD A LOS FENÓMENOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA SUBCUENCA DEL RÍO MURCA, VERTIENTE AL EMBALSE DEL RÍO GUAVIO, COLOMBIA.

Alumna: Medina Díaz, Viviana

Tutores: Mario Sánchez Gómez
Tomás Fernández del Castillo

Dpto: Geología
Ingeniería Cartográfica, Geodésica y
Fotogrametría

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	8
1.1.	Justificación	8
1.2.	Objetivos	9
1.3.	Zona de estudio	10
1.3.1.	Localización	10
1.3.2.	Geología	10
1.3.3.	Vegetación.....	13
1.3.4.	Suelos	14
1.3.5.	Climatología	17
1.3.6.	Régimen de precipitaciones	18
1.3.7.	Hidrología.....	21
1.3.8.	Amenazas sísmicas.....	23
2.	ANTECEDENTES	25
2.1.	Movimientos de ladera.....	25
	Caídas o desprendimientos	25
	Deslizamiento	25
	Flujo.....	27
	Movimientos complejos	27
2.2.	Evaluación del riesgo	28
3.	MATERIALES Y METODOLOGÍA.....	32
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1.	Inventario general de movimientos de ladera	36
	Modelo Diferencial del Terreno	36
	Eventos de remoción en masa reportados.....	37
	Digitalización, fotointerpretación y reconocimiento de los movimientos de ladera	39

4.2.	Análisis de factores condicionantes	44
	Descripción de factores condicionantes	44
	Coeficientes de correlación de factores condicionantes	53
4.3.	Análisis de susceptibilidad.....	57
5.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	61
6.	BIBLIOGRAFÍA	63

TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia	11
Ilustración 2 Mapa geológico de Cundinamarca. Fuente: (INGEOMINAS 1988) ..	12
Ilustración 3 Unidades de suelos de la zona de estudio. Elaboración propia. Fuente: (IGAC 2000).....	17
Ilustración 4 Isoyetas de precipitación anual multianual. (1974-2015. Fuente: Elaboración propia.....	19
Ilustración 5 Áreas de drenaje Microcuenca del río Guavio. (CORPOGUAVIOO, 2014).....	21
Ilustración 6 Hidrografía. Fuente: Elaboración propia.....	22
Ilustración 7 Mapa de Amenaza Sísmica de Cundinamarca. Tomada de (Acosta y Ulloa 2002).....	24
Ilustración 8 Modelos Digitales de Elevación con cobertura en el área de estudio Fuente: Alaska Satellite Facility.....	36
Ilustración 9 Modelo diferencial 2011 - 2017	37
Ilustración 10 Inventario de fenómenos de remoción en masa.	40
Ilustración 11 Deslizamientos. a. Rotacional b. Traslacional.....	42
Ilustración 12 Avalancha en el cauce del río Murca	43
Ilustración 13 Flujo en la vía Gachalá-Ubalá	43
Ilustración 14 Distribución de altitud en la zona de estudio.....	45
Ilustración 15 Mapa de pendientes en la zona de estudio. Elaboración propia	46
Ilustración 16 Mapa de orientaciones de la zona de estudio	47
Ilustración 17 Detalle geológico de la zona de estudio. Ajustado de Atlas Geológico Colombiano, 2015. Fuente: (Gómez , y otros 2015)	49
Ilustración 18 Unidades de suelos de la zona de estudio. Elaboración propia. Fuente: (IGAC 2000).....	50
Ilustración 19 Distribución de uso de suelo (IGAC, 2007)	51
Ilustración 20 Mapa de cobertura de la zona de estudio.....	53
Ilustración 21 Análisis de susceptibilidad Subcuenca del río Murca	58

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Valores Totales Anuales Multianuales de Precipitación - Est. Gachala (1974-2015).....	18
Gráfica 2 Variación de la precipitación mensual multianual. (1972-2014)	20
Gráfica 3 Distribución de deslizamientos reportados en el municipio de Gachalá. .	38
Gráfica 4 Distribución por clases de pendientes	46
Gráfica 5 Distribución de orientaciones	47
Gráfica 6 Prueba de Kolmogorov – Smirnov para factores condicionantes.....	57
Gráfica 7 Distribución de susceptibilidad	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros morfométricos.....	21
Tabla 2 Caudales máximos y mínimos según tiempo de retorno (Ecoforest 2005). .	23
Tabla 3 Tipos de movimientos de ladera. Tomado de González de Vallejo (2002) .	26
Tabla 4 Tipos de mapas de peligrosidad. (Gonzalez de Vallejo , y otros 2002)	29
Tabla 5 Materiales utilizados en el desarrollo del proyecto	32
Tabla 6. Noticias relacionadas con fenómenos de remoción en masa en el municipio de Gachalá (Fuente. El Tiempo).....	39
Tabla 7 Eventos reportados en bases de datos oficiales	39
Tabla 8 Proporción de uso del suelo en la zona de estudio. (IGAC, 2007).....	52

RESUMEN

El presente trabajo abarca el análisis de la susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera en la subcuenca del río Murca, vertiente del embalse del río Guavio en Colombia, mediante el método de la matriz implementado en un Sistema de Información Geográfica.

Se identificó un inventario de 252 eventos de los cuales el 87% corresponden a deslizamientos, 8% eventos son de tipo flujo y 5% avalanchas. Se realiza el análisis de factores determinantes entre los que se encuentran pendientes generalmente inferiores a 15°, orientación predominante hacia el Este, entre 1500 y 2000 m.s.n.m., en suelos afectados por erosión hídrica laminar en grado ligero, bien drenados, con texturas finas a medias, con usos Urbanos, Agrícolas y Pastos, dentro de unidades geológicas de una litología bastante homogénea y predominantemente arcillosa. Se obtiene una distribución de susceptibilidad del 78% en clase muy baja, 16% baja, 4% moderada, 1% alta y 1% muy alta.

ABSTRACT

This work comprises a landslide susceptibility analysis in the basin of river Murca, sub-basin of river Guavio dam in Colombia, by means of the matrix approach implemented in a Geographical Information System.

The inventory involves 252 landslide events, from which 218 correspond to slides (87%), 8% to flows and 5% to avalanches. A factor analysis has been carried out, using 8 determinant factors that include slopes generally lower than 15 °, predominant orientation towards the East, between 1500 and 2000 m.a.s.l, in soils affected by light laminar water erosion in a light grade, well drained, with fine textures, with urban, agricultural and pasture uses, in geological units of a quite homogenous lithology, mainly of clayey composition. The areal distribution of susceptibility classes is: 78% very low, 16% low, 4% moderate, 1% high y 1% very high.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

Los movimientos en masa se definen como todos aquellos movimientos que se presentan ladera abajo de una masa de roca, detritos o tierras por efectos de gravedad u otros factores detonantes o contribuyentes. Estos procesos pueden afectar el desarrollo normal de las actividades de las regiones, generando grandes pérdidas en la infraestructura y en los sectores económico, social y ambiental (Servicio Geológico Colombiano 2017)

En Colombia, la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa así como de sismos y erupciones volcánicas son muy frecuentes debido a su ubicación geográfica, que la sitúa en una zona de un 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, hasta la fecha y desde 1900, en el país se han reportado 16.969 movimientos en masa. Debido a estos, 5.119 personas han perdido la vida y 548.810 familias se han visto afectadas.

En el año 1991, Aguirre y Oliveira identificaron que más del 80% del Departamento de Cundinamarca se encuentra enfrentado a probabilidades medias y altas de ocurrencia de fenómenos catastróficos, particularmente del tipo deslizamiento, socavamiento, movimientos en masa y reptación, provocado entre otras cosas por la alta intervención antrópica a las laderas con el consecuente deterioro de cuencas hidrográficas y sus condiciones de estabilidad.

La Subdirección de Ingeniería Geoambiental del Ingeominas en 1998 priorizó en Cundinamarca, seis regiones en las que se presentan mayor concentración de fenómenos de remoción en masa: Región de la cuenca del Guavio, Región de la carretera Villavicencio, cuenca del río Sumapaz, vertiente oriental del río Negro, cuenca media del río Bogotá y el municipio de San Cayetano (CORPES 1998).

Es por esto que Colombia ha incluido en el Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, el objetivo de mejorar el conocimiento del riesgo de desastres en el territorio nacional, teniendo como primicia que la investigación y el conocimiento sobre riesgos de origen natural, socio-natural, tecnológico y humano no intencional constituyen la base tanto para la toma de decisiones sobre inversión segura, como para la incorporación de

criterios de sostenibilidad a los procesos de planificación del desarrollo, ordenamiento territorial y planificación ambiental. (UNGRD 2016)

Uno de los aspectos a tener en cuenta para el reconocimiento del terreno y toma oportuna de decisiones con respecto a los fenómenos de remoción en masa es la cartografía de la susceptibilidad que responde a la necesidad de evaluar lo propensa que es una zona a presentar problemas relacionados con remoción en masa, debido a la acción conjunta de factores condicionantes y factores desencadenantes (Ayala-Carcedo 2002).

El abordaje del análisis de susceptibilidad se puede presentar mediante un análisis determinista, a partir de cálculos de factores de seguridad de taludes específicos, y análisis no determinista o probabilista, mediante el análisis de correlación entre los movimientos de ladera y los factores que pueden condicionar el evento (Irigaray y Chacón 2002)

En este trabajo se pretende determinar la susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa de la subcuenca del río Murca, vertiente al Embalse del Guavio, a partir de un análisis probabilista, como aproximación al conocimiento de una de las áreas de drenaje de la región del Departamento que presenta mayor proporción de ocurrencia de este tipo de eventos. Este análisis parte de la identificación de factores condicionantes y desencadenantes, que permitirá calcular la probabilidad de ocurrencia de movimientos de ladera, no solo en zonas ya movilizadas sino también a zonas donde previamente no se haya identificado o reportado inestabilidad.

El área de estudio se delimitó como una *cuenca*, que constituye una unidad adecuada para la planificación ambiental del territorio, dado que sus límites fisiográficos se mantienen en un tiempo considerablemente mayor a otras unidades de análisis, y que además involucra una serie de factores y elementos tanto espaciales como sociales, que permiten una comprensión integral de la realidad del territorio (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible 2014).

1.2.Objetivos

El objetivo principal es realizar un análisis de la susceptibilidad del terreno a los movimientos de ladera en el área de estudio mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Como objetivos específicos se pueden indicar:

- Realizar una caracterización de la zona de estudio.

- Elaborar un inventario de procesos gravitacionales a partir de la interpretación ortofotografías disponibles y digitalización de rasgos.
- Identificar los factores condicionantes propios de la subcuenca del río Murca, vertiente al Embalse del Guavio, Colombia.
- Consolidar matriz de combinación de factores para la zona de estudio y para movimientos de ladera de acuerdo al método de la matriz.

1.3.Zona de estudio

1.3.1. Localización

La subcuenca del río Murca se encuentra ubicada en el municipio de Gachalá, perteneciente a la región del Guavio, dentro del departamento de Cundinamarca. Esta subcuenca es una de las 16 áreas de drenaje de la cuenca hidrográfica del río Guavio, tributario del río Upía, que a su vez descarga sus aguas en el río Meta, pertenecientes a la gran cuenca del río Orinoco. (Ilustración 1)

La subcuenca del río Murca ocupa el 25,61% del total del área del municipio, en esta se encuentra gran parte del embalse del Guavio, construido durante 1980 y 1992 así como la totalidad del casco urbano del municipio de Gachalá. Limita al sur con el municipio de Medina, y al norte con los municipios de Ubalá y Gama. La principal vía de comunicación es la vía secundaria Gama- Gachalá, Gachalá Ubalá.

Ocupa una superficie de 10043,92 ha, comprendida entre las coordenadas, Este mínima: 1.057.712,37 y Este Máxima: 1.067.800,50; Norte Mínima: 999.950,37 y Norte Máxima: 1.014.408,61.¹

1.3.2. Geología

La zona de estudio está situada en la región Andina y se encuentra ligada a la geología de la cordillera oriental de Colombia, abarca en tiempo geológico eventos que se han producido desde el Paleozoico superior hasta el presente. En la Ilustración 2 se encuentra el mapa geológico de Cundinamarca en el que se pueden diferenciar las zonas de cuatro periodos geológicos: Paleozoico, Cretácico (Mesozoico), Terciario y Cuaternario. En el recuadro rojo se indica el área en la que se encuentra ubicada la zona de estudio.

¹ Sistema de coordenadas: MAGNA Colombia Bogotá. Proyección: Transversa de Mercator. Datum. MAGNA. Falso Este: 1.000.000,000 Falso Norte: 1.000.000,000. Meridano central: -74,0775

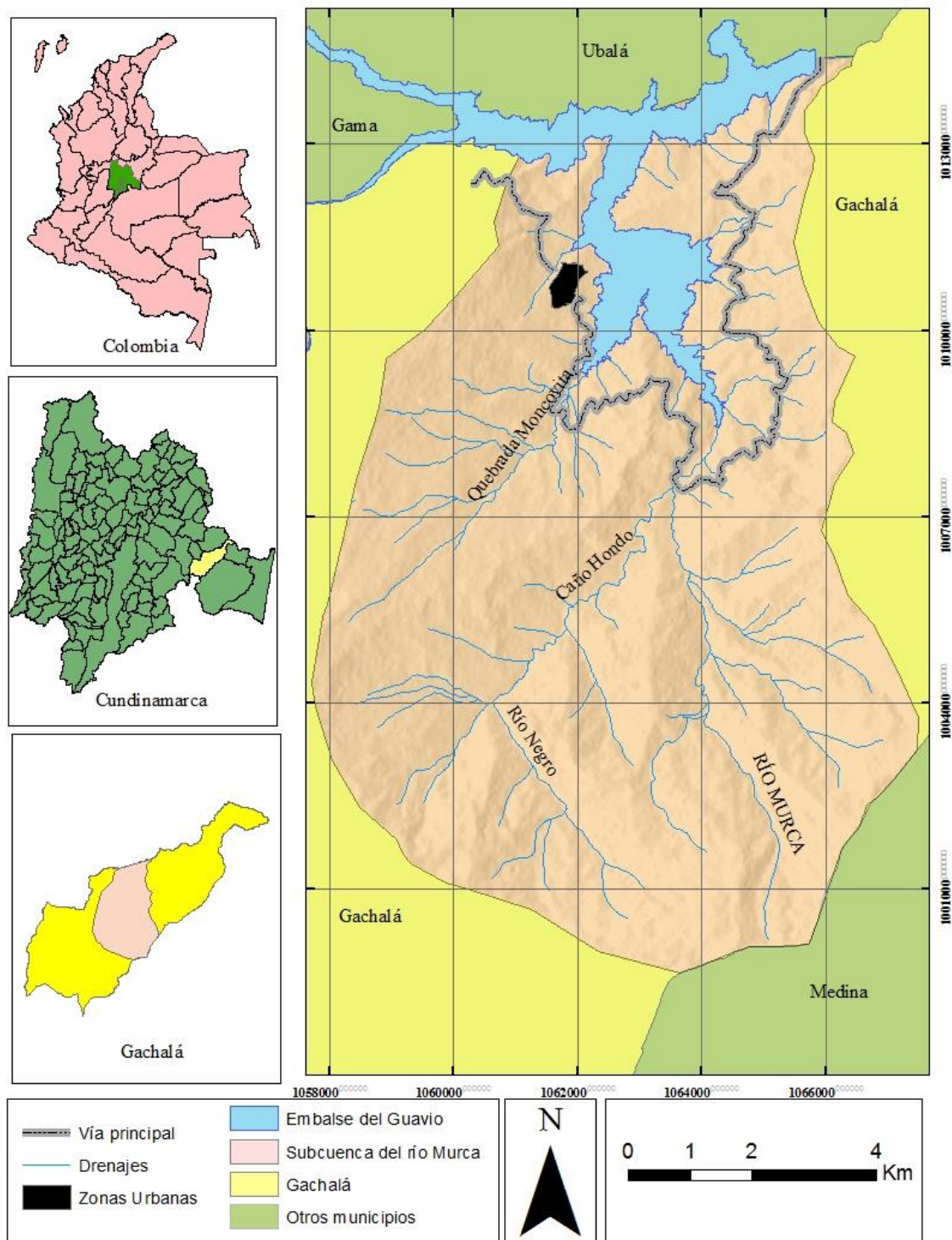


Ilustración 1 Localización de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia

El departamento de Cundinamarca hace parte del bloque tectónico Sabana de Bogotá-Anticlinorio de Farrallones, de acuerdo al Atlas Geológico de Colombia (2015). En la zona de estudio se presentan cinco unidades geológicas: *DC-sctm*, *b1-Sctm*, *b1-u1*, *b1k1-sm* y *Qc*.

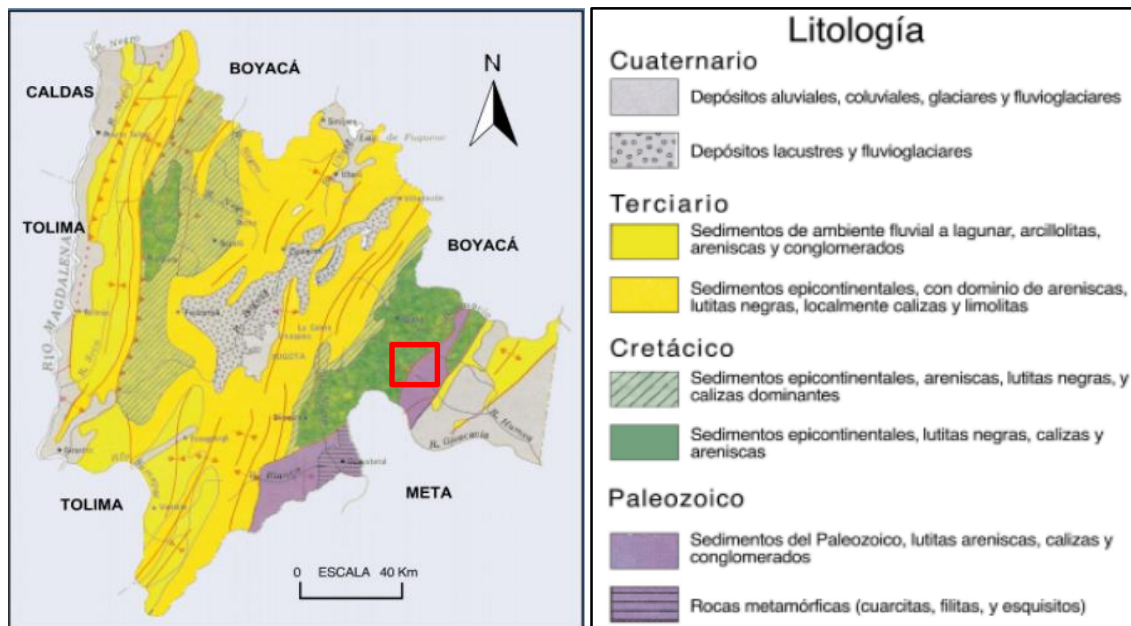


Ilustración 2 Mapa geológico de Cundinamarca. Fuente: (INGEOMINAS 1988)

La unidad DC-Sctm, hace parte del grupo Farallones del periodo entre el Devónico y el Carbonífero de la era paleozoica. Está conformada por cuarzoarenitas, arcillolitas, lodolitas grises y, ocasionalmente, calizas y conglomerados. Constituye un basamento sedimentario (areno-lodoso) del Paleozoico superior, sobre el cual se registran los primeros avances del mar Cretácico sobre esta región. El grupo constituye una potente sucesión sedimentaria, predominantemente siliciclástica, con arenitas, limolitas y lodolitas muy compactas, de coloración gris, roja o verde (Servicio Geológico Colombiano 2013).

De la era cretácica se presenta la unidad b1-Sctm, denominada formación Santa Rosa de edad berriasiano, que representa una sucesión de rocas siliciclásticas donde aparecen conglomerados y/o arenitas en la base y le siguen limolitas que muestran cambios en la litología hacia el oriente, donde la unidad adquiere un carácter más lodolítico.

La siguiente formación del periodo cretácico es la de Ubalá (b1-u1), también del piso berriasiano, en la que se diferencian varios niveles de arenitas y calizas que se intercalan con paquetes de arcillolitas. Navarrete (1975), en las perforaciones realizadas en el sector de Cueva Oscura, describe de base a techo 20,4 m de conglomerados, a lo que le siguen 40,2 m de arenitas y calizas arenosas, y la parte superior son intervalos de 6, 12 y 1 m de calizas, arcillolitas y arenitas (Servicio Geológico Colombiano 2013).

La unidad b1k1-Sm es la formación Lutitas de Macanal del piso valanginiano (Cretácico inferior), que cubre el 69% del área de estudio. Tiene predominancia arcillosa

con intercalaciones significativas de arenitas y limolitas que aflora entre las formaciones del Cretácico basal (Ubalá, Santa Rosa, Chivor o Bata) y la Formación Las Juntas o Grupo Farallones del periodo cretácico comprendida entre el Berriasiano y el Cenomaniano, (Servicio Geológico Colombiano 2013)

La unidad Qc (depósitos coluviales) corresponde a las unidades inconsolidadas del cuaternario, en este caso particular a depósitos coluviales de alto ángulo y tamaño variable acumulados posiblemente en el Holoceno y que se encuentran cubriendo discordantemente a las rocas preexistentes.(Servicio Geológico Colombiano 2013).

Estructuralmente, el área de estudio se encuentra ubicada en la zona que forma la mayor parte de las exposiciones del Cretácico inferior del oriente de la Cordillera Oriental. Se caracteriza por anticlinales angostos con planos axiales relativamente verticales, el más característico es el anticlinal del Escobar.

Se encuentran dos estructuras de fallamiento sobre el área de estudio, la falla de Toquiza, una falla inversa con vergencia al occidente y la falla de Murca, una falla de cabalgamiento con dirección N45°E y vergencia al occidente que cabalga a la Formación Santa Rosa (Berriasiano) sobre la Formación Lutitas de Macanal (Valanginiano) en la mayor parte de su trayectoria.

1.3.3. Vegetación

Con respecto a la zonificación climática de Holdridge que relaciona las condiciones de biotemperatura, precipitación y humedad, se encuentran presentes las zonas de Bosque pluvial montano (bp-M), Bosque muy húmedo montano bajo (bmh-MB), Bosque muy húmedo premontano (bmh-PM) (Ecoforest 2005).

Por otra parte, dentro de la zona de estudio se encuentran tres espacios protegidos considerados como estratégicos, debido a los bienes y servicios ambientales que ofertan, principalmente a la capital del país y municipios de la sabana de Bogotá. El 22,06% de la Reserva del Municipio de Gachalá se encuentra en la zona de estudio, el 0,52% de la Reserva Corredor Biológico P.N.N.C., el 96,96% Reserva el Escobal y el 3,70% del Parque Nacional Natural Chingaza (Corpoguavio 2013).

En relación a la vegetación no se encuentran presentes páramos. Las especies arbustivas más representativas en esta área de drenaje son: Fique (*Fourcraea macrophylla*), Yarumo (*Cecropia* sp.), Chusque (*Chusquea tesellata*), Caña brava (*Gynerium sagittatum*), Cañafístula (*Cassia spectabilis*), Guadua (*Guadua angustifolia*),

Sauco (*Sambucus peruviana*), tuno (*Miconia summa*), Mora (*Rubus sp.*), Retamo (*Spartium junceum*) y Dálías (*Dahlia sp.*)

Las especies más típicas de bosques presentes son: Gaque (*Clusia multiflora*), Siete cueros (*Tibouchina lepidota*), Guamo (*Inga sp.*), Eucalipto (*Eucaliptus globulos*), Ocobo (*Tabebuia rosea*), Ceiba blanca (*Hura crepitans*), Alcaparro (*Cassia viarum*), Ciprés (*Cupressus macrocarpa*), Cerezo (*Prunus sp.*).

1.3.4. Suelos

De acuerdo al Estudio General de Suelos y Zonificación de Tierras del departamento de Cundinamarca del IGAC, la zona de estudio presenta 6 unidades de suelos que se encuentran representadas en la Ilustración 3.

- *MQCe*:

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Lomas

Material parental: Rocas clásticas limoarcillosas y mantos de ceniza volcánica

Clima: Medio húmedo

Unidades Cartográficas y Sus componentes Taxonómicos Principales: Asociación Typic Udorthents, Typic Melanudands

Características del Relieve y los suelos: Relieve ligera a moderadamente quebrado, con pendientes 7-12, 12-25 y 25-50%, afectado en sectores por frecuente pedregosidad superficial; suelos profundos a muy superficiales, bien a moderadamente bien drenados, de texturas medias a finas, reacción muy fuertemente ácida a neutra, saturación de aluminio baja y fertilidad, en general, moderada

Factores limitantes: Pendientes ligeramente escarpadas con gradientes de 25 a 50%.

- *MLCe*

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Lomas

Material parental: Rocas clásticas limoarcillosas y mantos de ceniza volcánica

Clima: Frío húmedo

Unidades Cartográficas y Sus componentes Taxonómicos Principales: "Complejo Humic Dystrudepts, Typic Argiudolls, Typic Hapludands, Thaptic Hapludands.

Características del Relieve y los suelos: "Relieve ligera a fuertemente quebrado, con pendientes 7-12, 12-25 y 25-50%, afectado en sectores por erosión hídrica laminar ligera; suelos profundos a superficiales, bien drenados, con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas, reacción extremada a fuertemente ácida, saturación de aluminio media a alta y fertilidad, en general, moderada.

Factores limitantes: Pendientes ligeramente escarpadas con gradientes de 25 a 50%.

- *MQVe*

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Crestones

Material parental: Rocas clásticas limoarcillosas y químicas carbonatadas

Clima: Medio húmedo

Unidades Cartográficas y Sus componentes Taxonómicos Principales: Asociación Typic Udorthents, Lithic Hapludolls, Humic Eutrudepts.

Características del Relieve y los suelos: Relieve ligera a moderadamente escarpado, con pendientes de 25 a 75%, afectado en sectores por erosión hídrica laminar en grado ligero, presencia sectorizada de afloramientos rocosos; suelos superficiales a profundos, bien drenados, con texturas finas a medias, reacción extremadamente ácida a medianamente alcalina, saturación de aluminio baja y fertilidad moderada a alta.

Factores limitantes: Pendientes ligeramente escarpadas con gradientes de 25 a 50%.

- *MKCf*

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Crestones

Material parental: Rocas clásticas limoarcillosas y arenosas con depósitos de ceniza volcánicacásticas limoarcillosas y químicas carbonatadas

Clima Frío muy húmedo

Unidades Cartográficas y Sus componentes Taxonómicos Principales: Grupo Indiferenciado, Andic Dystrudepts, Typic Hapludands, Typic Udorthents.

Características del Relieve y los suelos: Relieve moderadamente quebrado a moderadamente empinado, con pendientes 12-25 y 25-75%, afectado en sectores por erosión hídrica laminar ligera; suelos profundos a superficiales, bien drenados, de texturas

finas a moderadamente gruesas, reacción fuerte a medianamente ácida, mediana saturación de aluminio y fertilidad baja a moderada.

Factores limitantes: Pendientes moderadamente escarpadas que oscilan entre 50 y 75%.

- *MLIg*

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Filas - Vigas

Material parental: Rocas dinamotermas de bajo grado y mantos de ceniza volcánica

Clima Frío húmedo

Unidades Cartográficas y Sus componentes Taxonómicos Principales: Asociación Humic Dystrudepts, Typic Hapludands, Lithic Dystrudepts.

Características del Relieve y los suelos: Relieve ligera a fuertemente escarpado, con pendientes 25-50% y superiores a 50%, afectado en sectores por erosión hídrica laminar ligera; suelos moderadamente profundos a superficiales, bien drenados, de texturas moderadamente finas a gruesas, reacción muy fuerte a medianamente ácida, saturación de aluminio alta y fertilidad baja.

Factores limitantes: Pendientes fuertemente escarpadas con gradientes superiores al 75% y suelos superficiales.

- *MGlg*

Paisaje: Montaña

Tipo de relieve: Filas - Vigas

Material parental: Rocas dinamotermas de bajo grado y mantos de ceniza volcánica

Clima Muy frío muy húmedo

Unidades Cartográficas y Sus componentes Taxonómicos Principales: Asociación Typic Hapludands Humic Lithic Dystrudepts

Características del Relieve y los suelos: Relieve fuertemente quebrado a fuertemente escarpado, con pendientes 25-75%, afectado en sectores por erosión hídrica laminar ligera; suelos profundos a superficiales, bien drenados, con texturas finas a moderadamente gruesas, reacción muy fuertemente ácida a ligeramente alcalina, saturación de aluminio alta y baja fertilidad.

Factores limitantes: Pendientes fuertemente escarpadas con gradientes superiores al 75% y clima muy frío.

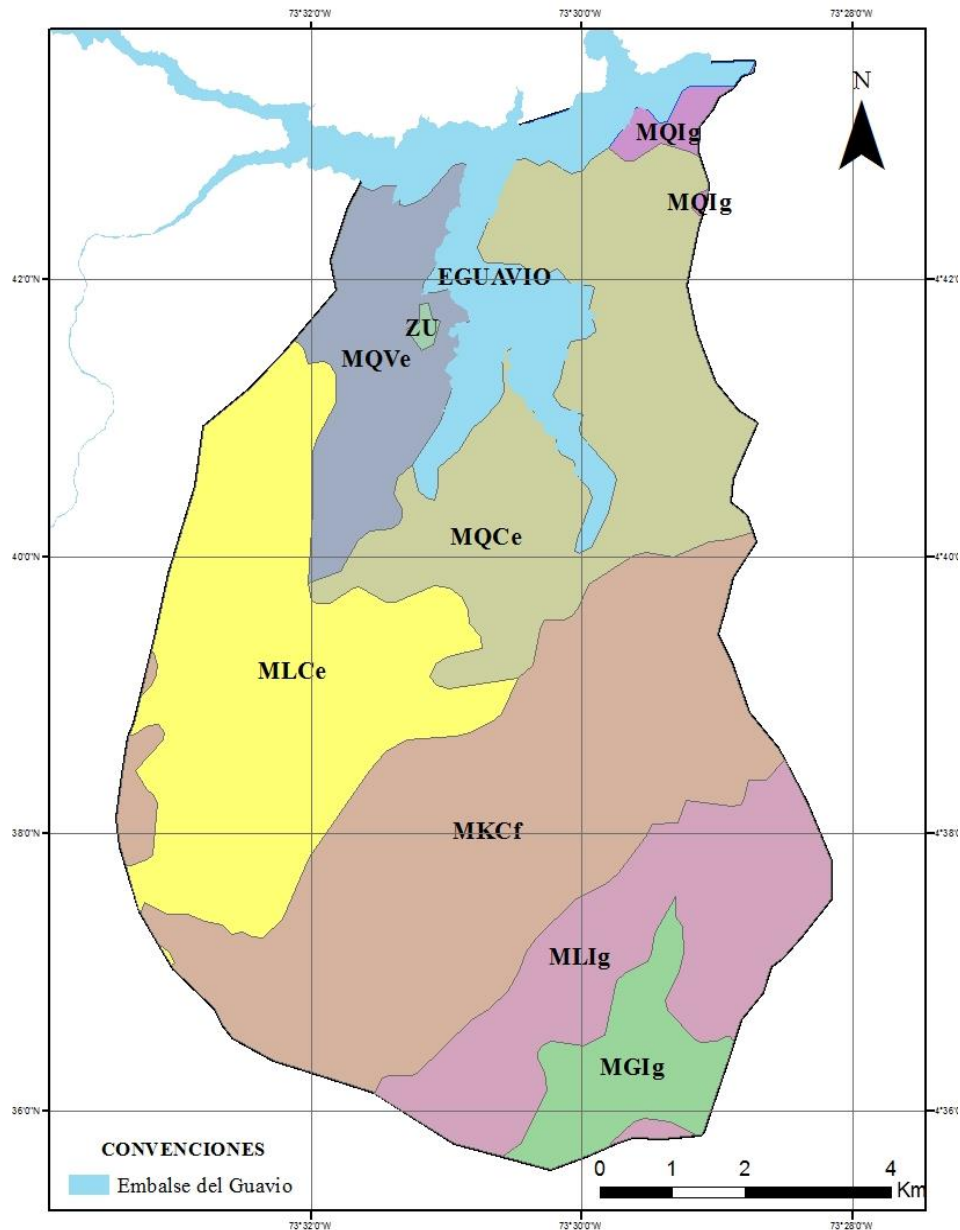


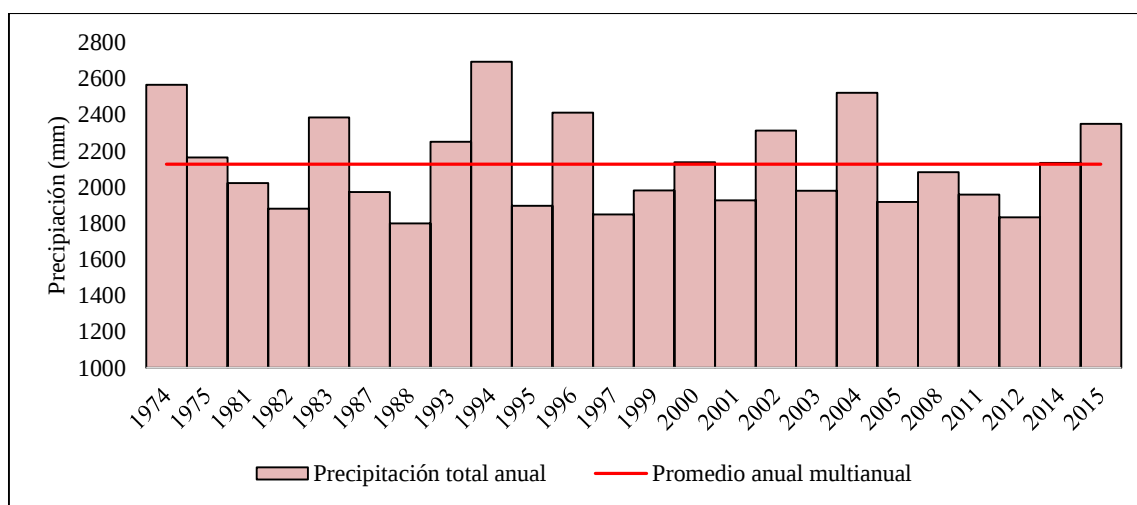
Ilustración 3 Unidades de suelos de la zona de estudio. Elaboración propia. Fuente: (IGAC 2000)

1.3.5. Climatología

En la región del Guavio se producen amplios sistemas de nubes con un gran desarrollo vertical, y la ocurrencia de intensas y frecuentes precipitaciones, debido a la localización geográfica de Colombia en la Zona de Confluencia Intertropical- ZCIT. Este comportamiento se ve modificado por las condiciones orográficas locales, el mecanismo generador de lluvias en la región, con elementos complementarios asociados al efecto Foehn, que tiene lugar cuando el aire caliente y húmedo se ve obligado a remontar una

cadena montañosa, que intensifican los procesos de crecimiento de las nubes y producen lluvias de fuerte intensidad. (Corpoguavio 2013)

En gran parte de la región del Guavio se presenta una distribución de las lluvias tipo monomodal con una sola temporada de lluvia que inicia a finales de marzo y se extiende hasta noviembre. El promedio total anual multianual de lluvia caída en el periodo 1974 – 2017 en el sector de la estación Gachalá corresponde a 2126 mm de precipitación, según se puede apreciar en el histograma presentado en la Gráfica 1, identificando picos de precipitación en el año 1994 con 2693 mm y 2004 con 2522 mm.



Gráfica 1 Valores Totales Anuales Multianuales de Precipitación - Est. Gachala (1974-2015)

De acuerdo al mapa de isoyetas (Ilustración 4) la distribución espacial de la lluvia en la zona de estudio varía desde 2000 mm hasta 3400 mm.

La zona de estudio presenta una Temperatura promedio de 17 °C, con variación entre 12°C y 20°C, evapotranspiración real promedio de 921 mm, evapotranspiración potencial promedio de 1,095 mm. De acuerdo a la clasificación climática de Holdridge el área de estudio comprende las zonas de Frío muy húmedo, Medio muy húmedo, Muy frío pluvial (Ecoforest 2005).

1.3.6. Régimen de precipitaciones

De acuerdo a la información obtenida de las 5 estaciones hidrometeorológicas cercanas a la zona de estudio (Ilustración 4) que forman parte de la red de estaciones del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) se identifica la zona con un régimen de precipitaciones constante, con 19 días promedio de precipitación mensual, con un promedio de precipitación media mensual de 220 mm, precipitación

anual multianual promedio de 2638² mm (entre 1972 y 2014) y un promedio de precipitación máxima en 24 horas de 114,5 mm.

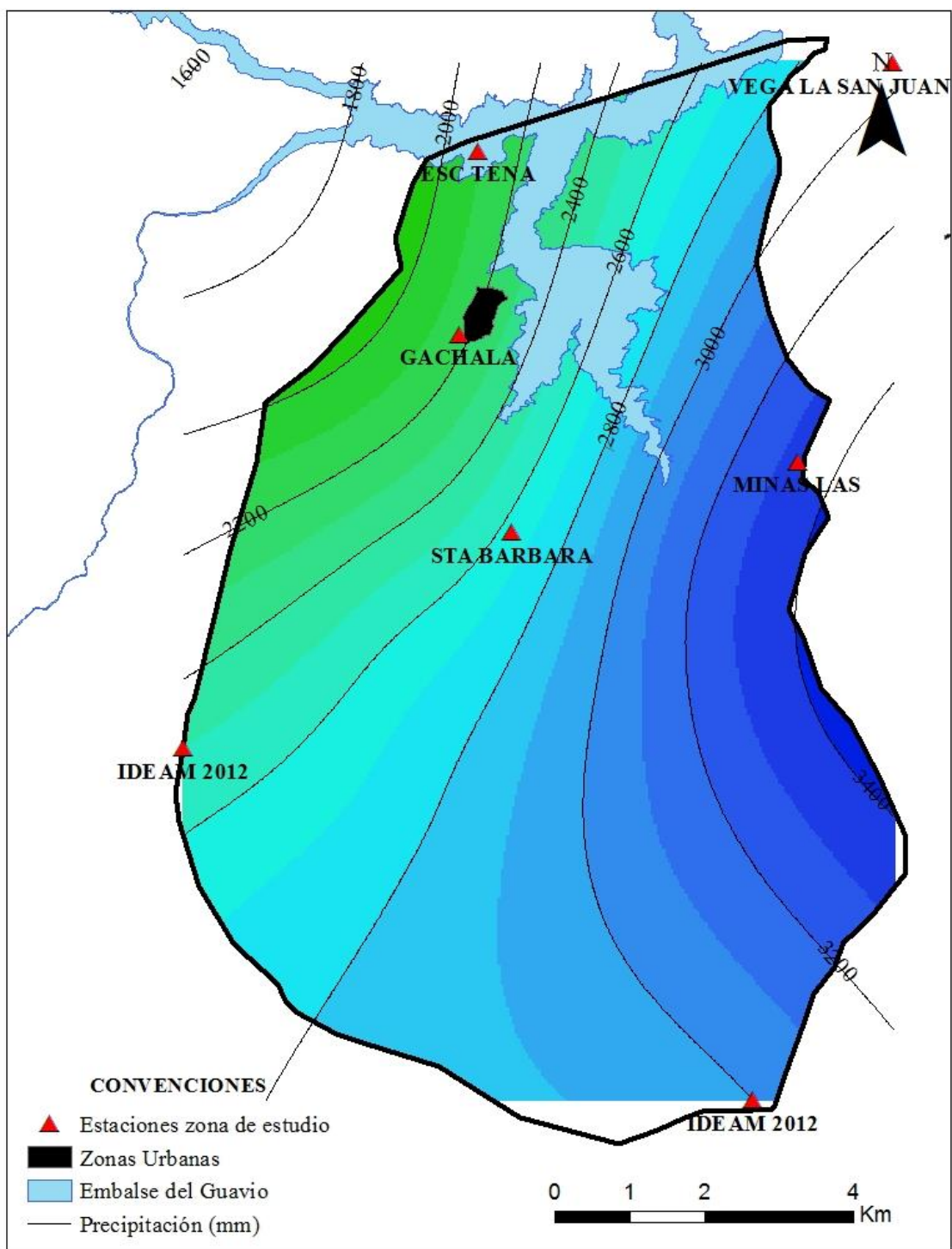
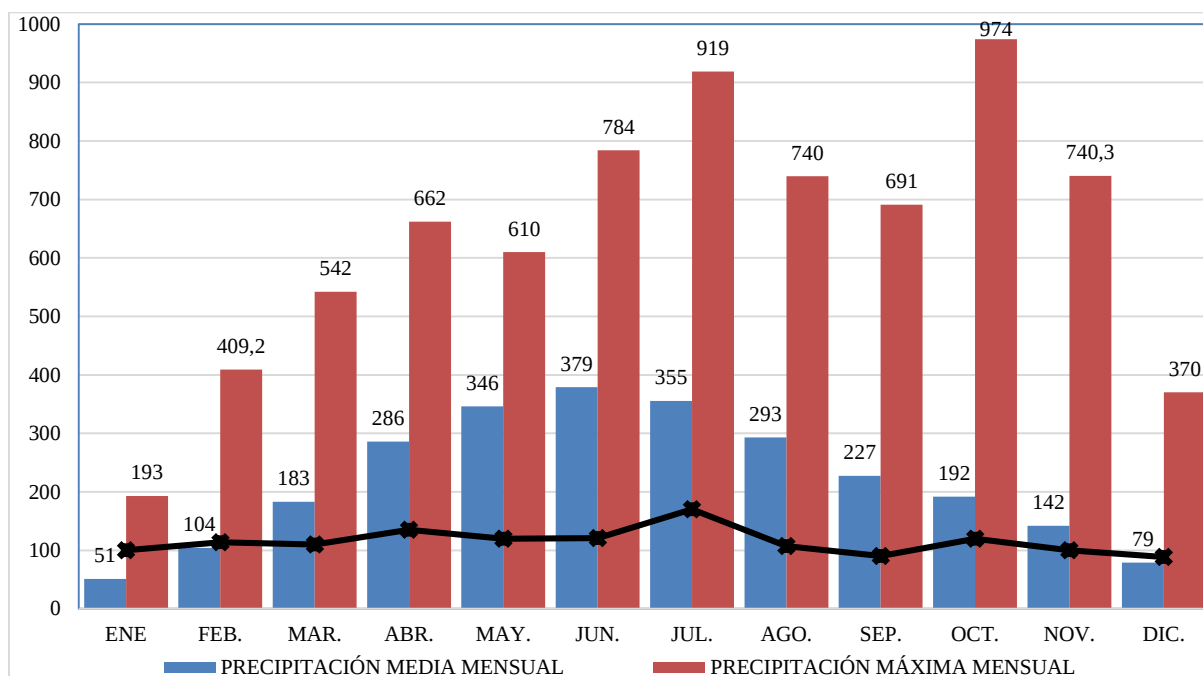


Ilustración 4 Isoyetas de precipitación anual multianual. (1974-2015. Fuente: Elaboración propia

² Promedio de precipitación anual multianual de las estaciones Gachalá, La vega San Juan, Santa Bárbara, Las Minas y Tena.

En la Gráfica 2 se presenta la variación de la precipitación mensual multianual, de los años 1972 a 2014 en la que se evidencia un incremento de la precipitación media mensual entre los meses de Abril a Agosto. En contraposición se presentan los datos de la máxima precipitación que se presentó en cada uno de los meses de los años evaluados. En el mes de Octubre de 1999 se presentó un valor de 974 mm, que es el valor más alto de precipitación mensual presentado en el periodo evaluado, seguido por los 919 mm presentados en el mes de Julio de 1983. El valor de 784 mm del mes de Junio se presentó en el año 1984. En todos los meses se han presentado casos en los que el valor máximo de precipitación mensual, ha superado el valor de la media.

En la gráfica también se presenta el valor máximo de precipitación presentado en 24 horas, que en la mayoría de los casos alcanza el 50% de la precipitación media mensual. Como ejemplo, el mes de julio con una precipitación media mensual multianual de 355 mm presentó un valor máximo de 170 mm en el año 1983, que indica que en un solo día llovió el 48% del valor medio del mismo mes, situación que incrementa la susceptibilidad del terreno, ya que los procesos gravitacionales se desencadenan cuando se presentan fuertes lluvias, ocasionando que los poros del sedimento se llenen de agua, destruyendo la cohesión entre las partículas y permitiendo que se deslicen unas sobre otras con relativa facilidad.



Gráfica 2 Variación de la precipitación mensual multianual. (1972-2014)

1.3.7. Hidrología

El río Murca es una de las 16 áreas de drenaje de la Microcuenca del río Guavio, Subcuenca del río Upía, Cuenca del Río Meta y Zona hidrográfica del río Orinoco. (Ilustración 5).

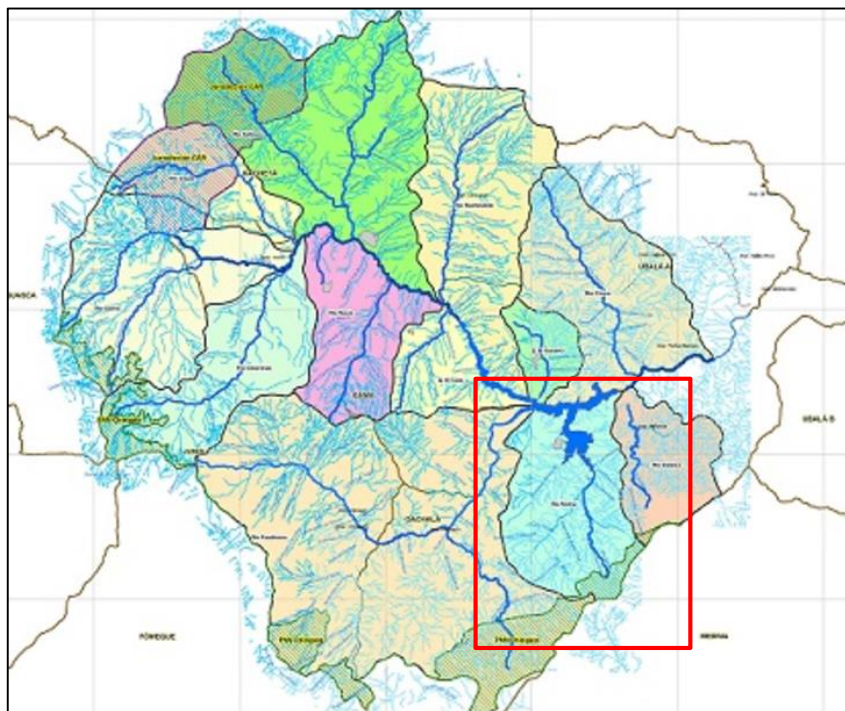


Ilustración 5 Áreas de drenaje Microcuenca del río Guavio. (CORPOGUAVIOO, 2014)

El detalle de la hidrografía del área de drenaje del río Murca se presenta en Ilustración 6 y las características morfométricas en la Tabla 1 (Ecoforest 2005).

Tabla 1 Parámetros morfométricos

Parámetro	Valor
<i>Pendiente Media (m/m):</i>	0,21
<i>Área (Ha):</i>	10043,92 Ha
<i>Perímetro (Km.):</i>	45,66
<i>Patrón de Drenaje:</i>	Subparalelo
<i>Longitud de Drenajes (Km.):</i>	146,55
<i>Longitud de Drenajes (m):</i>	146.553,41
<i>Densidad de Drenaje (m/Km.2):</i>	1.458,48
<i>Longitud Cauce Principal (Km.):</i>	11,78
<i>Altura Media Cuenca (m):</i>	2.400,00
<i>Longitud Axial Cuenca (m):</i>	7.476,32
<i>Ancho Cuenca (m):</i>	7.701,49
<i>Índice de Gravelius:</i>	1,28
<i>Tiempo de Concentración (minutos):</i>	93,70
<i>Velocidad (m/s):</i>	2,10

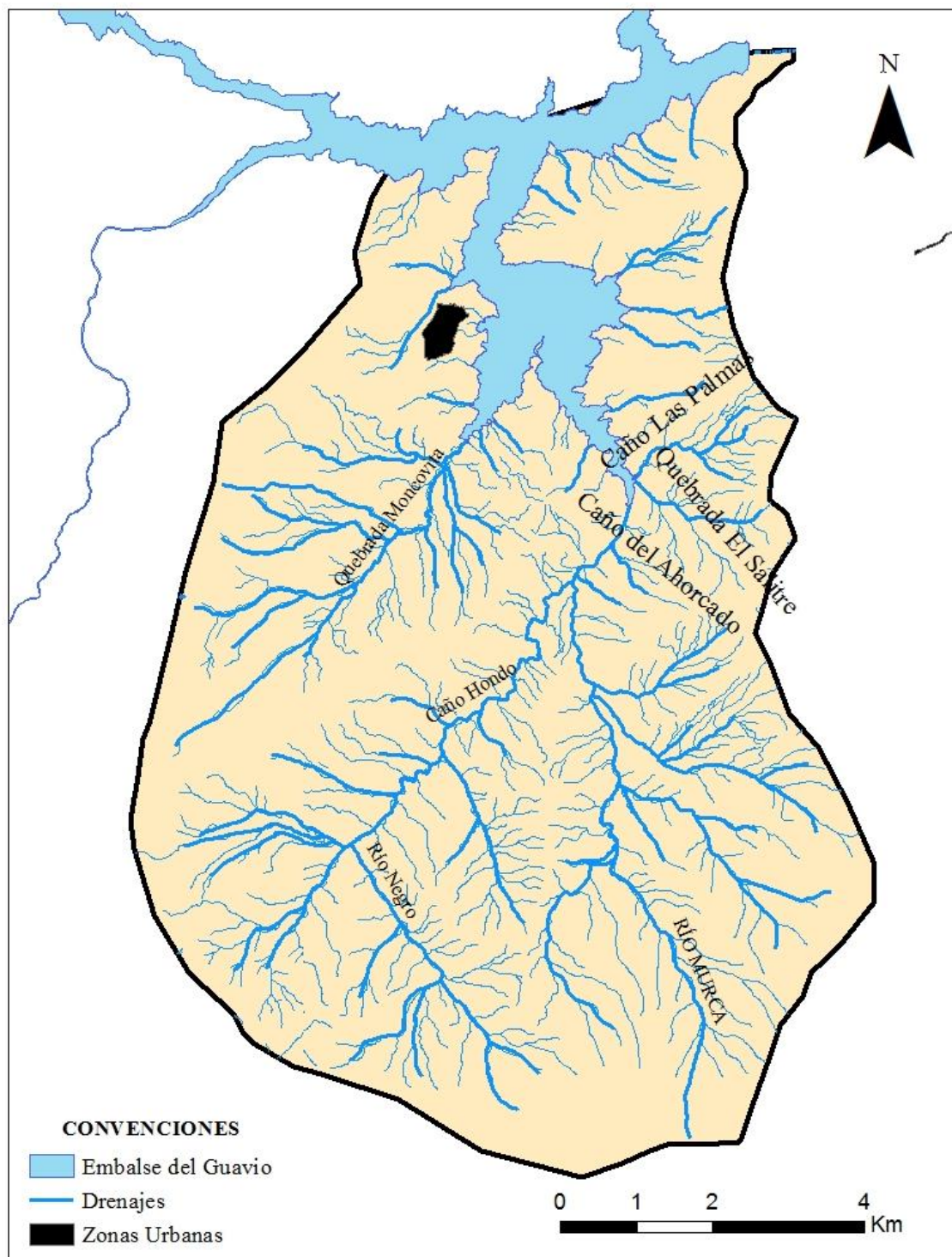


Ilustración 6 Hidrografía. Fuente: Elaboración propia

Se identifican tres drenajes principales: el río Murca, el Caño Hondo y la Quebrada Moncovita. El río Murca presenta un caudal máximo de $209 \text{ m}^3/\text{s}$ en un periodo de retorno de 2 años y de $484 \text{ m}^3/\text{s}$ en 100 años. Es la tercera área de drenaje después de los ríos Farallones y Gachetá en presentar el máximo valor de caudal. En la Tabla 2 se presentan los caudales máximos y mínimos del río Murca para diferentes periodos de retorno.

Tabla 2 Caudales máximos y mínimos según tiempo de retorno (Ecoforest 2005)

Periodo de retorno	Caudales máximos (m³/s)	Caudales mínimos (m³/s):
Tr 2	209	1,078
Tr 5	292	0,565
Tr 10	343	0,407
Tr 20	389	0,322
Tr 50	445	0,264
Tr 100	484	0,242

1.3.8. Amenazas sísmicas

La sismicidad en el Departamento de Cundinamarca y regiones aledañas es alta comparada con otras zonas del país. La zona de estudio se encuentra ubicada en la región que presenta valores de aceleración más altos del Departamento (Ilustración 7).

Se tiene registro del 22 de Diciembre de 1923 se presentó un sismo con epicentro en el municipio de Gachalá de magnitud 6,3 Ms e Intensidad 8K (Acosta y Ulloa 2002), que estuvo asociado al plano de falla del Guaicáramo ubicada a 40 km de la zona de estudio. Esta falla tiene rasgos geomorfológicos de actividad reciente, ya que allí, el subsuelo llanero está chocando permanentemente contra la Cordillera Oriental, logrando incrustarse y avanzar bajo este sistema montañoso.

El sistema de fallas Santa María-Servitá ubicado a 14 km de distancia de la zona de estudio también se encuentra clasificado como uno de los sistemas activos del país, por lo que representa una alta probabilidad de ocurrencia de eventos sísmicos que tendrían como consecuencia fenómenos de remoción en masa. Sobre la zona de estudio se encuentran dos fallas, la de Murca (de cabalgamiento con dirección N45°E) y la de Toquiza (falla inversa).

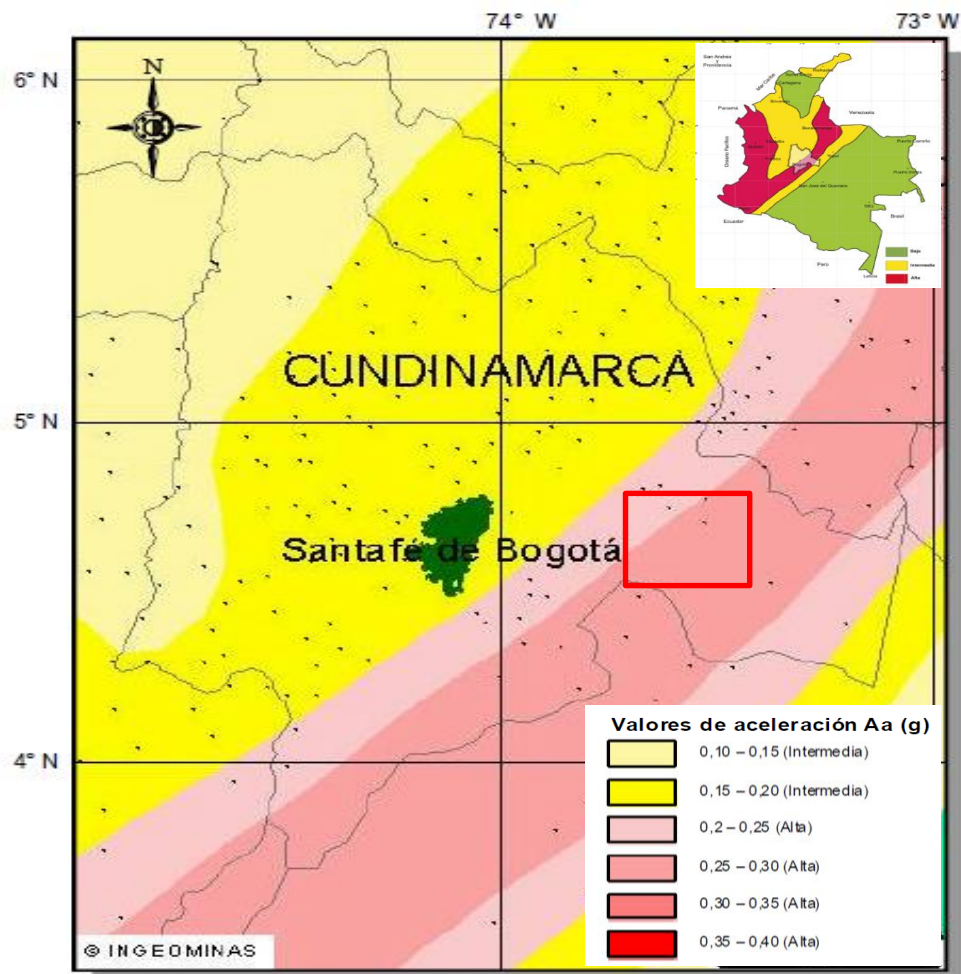


Ilustración 7 Mapa de Amenaza Sísmica de Cundinamarca. Tomada de (Acosta y Ulloa 2002)

2. ANTECEDENTES

2.1. Movimientos de ladera

Globalmente, existen diferentes términos relacionados con movimientos de ladera que son utilizados para describir el mismo fenómeno. Para este trabajo los términos “*movimientos de ladera, movimientos en masa, fenómenos de remoción en masa y procesos gravitacionales*” responderán a la definición de *movimiento en masa* establecida en el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano. Este término incluye todos aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos o de tierras, por efectos de la gravedad, lo que concuerda con la definición de deslizamiento (“*landslide*”) de Cruden (1991).

La clasificación para los movimientos de ladera depende del enfoque y criterios utilizados. Así, el presente estudio se basa en clasificaciones anteriormente publicadas (Varnes, 1958; Hungr et al., 2014), en las que se diferencian los movimientos por el mecanismo de movimiento y por el tipo de material involucrado. De manera general, estos movimientos se pueden dividir en caídas o desprendimientos (falls), deslizamientos (slides), flujos (flows) y movimientos complejos (complex movements) (Tabla 3).

Caídas o desprendimientos

Son los movimientos en caída libre de distintos materiales tales como rocas, detritos o suelos. Este tipo de movimiento se origina por el desprendimiento del material de una superficie inclinada, el cual puede rebotar, rodar, deslizarse o fluir ladera abajo posteriormente. Son típicos en macizos rocosos y generalmente están controlados por las discontinuidades. Este tipo de movimientos requiere una topografía como escarpes o pendientes fuertes y se caracterizan por la acumulación de bloques de tamaño variable en el pie de ladera.

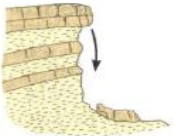
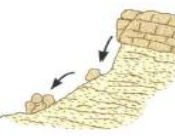
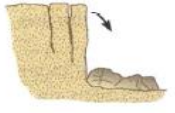
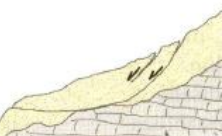
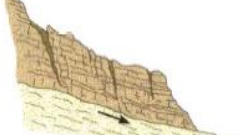
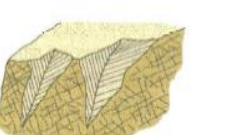
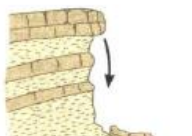
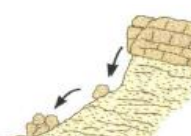
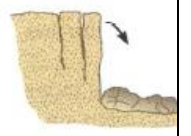
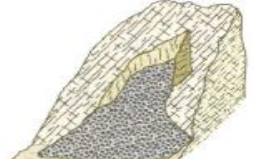
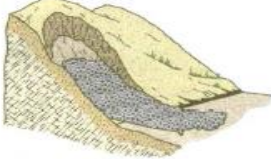
Deslizamiento

En este tipo de movimiento de ladera el desplazamiento del terreno se produce sobre una o varias superficies de rotura bien definidas. La velocidad suele ser variable e implican a volúmenes grandes en general. Con frecuencia, la formación de grietas transversales es la primera señal de la ocurrencia de este tipo de movimientos, las cuales se localizan en la zona que ocupa el escarpe principal.

El tipo de deslizamiento está definido por la superficie de ruptura; las superficies curvas, cóncavas o en forma de cuchara se asocian a deslizamientos rotacionales, las

superficies de ruptura semiplanas u onduladas a los movimientos traslacionales, y las superficies planas a los deslizamientos planos.

Tabla 3 Tipos de movimientos de ladera. Tomado de González de Vallejo (2002)

TIPOS DE MOVIMIENTO	
Desprendimiento	      Rocas Suelos
Deslizamientos	      Suelos Rocas
Flujos	   Suelos Derrubios Bloque rocosos
Desprendimientos Vuelcos	      Rocas Suelos
Movimientos Complejos	  Rocas Derrubios

Flujo

Bajo este sustantivo se agrupan a diferentes movimientos de ladera que tienen en común la deformación interna y continua del material y la ausencia de una superficie neta de desplazamiento. El movimiento de los flujos es muy parecido al de un fluido viscoso, razón por la que la distribución de velocidades no es homogénea y origina la formación de lóbulos a partir del predominio del movimiento intergranular. Los flujos envuelven todos los tipos de materiales existentes.

Movimientos complejos

Los movimientos complejos ocurren cuando el tipo de movimiento inicial se transforma en otro al ir desplazándose ladera abajo, entre los más importantes cabe destacar los aludes o avalanchas de rocas y los flujos deslizantes. Las avalanchas o aludes de rocas consisten en la movilización a gran distancia de grandes masas de rocas y detritos, las cuales viajan a gran velocidad.

Los factores que controlan los movimientos de las laderas son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno. Los factores condicionantes dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los desencadenantes pueden ser considerados como factores externos que provocan o desencadenan las inestabilidades (Gonzalez de Vallejo , y otros 2002)

González de Vallejo (2002) recopila la influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y de las laderas. Así como *factores condicionantes* relaciona el relieve (pendientes y geometría), litología (composición, textura), estructura geológica y estado tensional, las propiedades geomecánicas de los materiales, deforestación y meteorización.

Para que un movimiento de ladera se presente es necesaria la presencia de cierta pendiente, por lo que el relieve juega un papel definitivo en el análisis; las regiones montañosas son las zonas más propensas a los movimientos de ladera. Sin embargo en lugares con pendientes bajas también es posible la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa.

La estructura geológica, estratigrafía y litología determinan la potencialidad de movimientos en los diferentes tipos de materiales rocosos y suelos, y la existencia de planos de discontinuidad que pueden actuar como superficies de rotura. Esta característica también afecta el comportamiento hidrogeológico de los materiales y su comportamiento ante determinadas cantidades de precipitación también constituye un factor

condicionante. Así mismo, las características propias de la zona dadas por su zonificación climática y distribución hidrográfica condicionan la ocurrencia de eventos.

Como *factores desencadenantes* identifica las precipitaciones y aportes de agua, el cambio en las condiciones hidrológicas, la aplicación de cargas estáticas o dinámicas, cambios morfológicos y de geometría en las laderas, erosión o socavación del pie, o acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas o sequías).

Los factores desencadenantes pueden ser de carácter natural o antrópico, dentro de los primeros se encuentra el régimen de precipitación en la zona, ya que la mayoría de fenómenos de remoción en masa en Colombia son hidrogravitacionales y están relacionados directamente con la ocurrencia de lluvias intensas; en consecuencia, debe considerarse la respuesta del terreno a precipitaciones intensas durante horas (tormentas) o días, y la respuesta en épocas secas y lluviosas a lo largo del año o plurianual.

Las inundaciones y avenidas incrementan el efecto desestabilizador de las lluvias en las laderas de los valles fluviales. Así, el papel erosivo de la corriente de agua en la base de la ladera se une al de la lluvia, saturando el terreno, generando flujos y deslizamientos o reactivando movimientos.

Los eventos sísmicos también son un factor desencadenante que pueden provocar movimientos de todo tipo en las laderas, dependiendo de las características de los materiales, de la magnitud y de la distancia al epicentro, o reactivar antiguos deslizamientos.

El uso del suelo, o más bien su modificación, puede constituirse como factor condicionante o desencadenante ya que procesos de deforestación extensiva, agricultura intensiva y otro tipo de intervenciones antrópicas puede condicionar y en algunos casos desencadenar (cuando la intervención es excesiva) la ocurrencia de movimientos de ladera.

2.2. Evaluación del riesgo

La ecuación general de riesgo (Varnes 1984), adoptada por la United Nations Disaster Relief Organization (UNDRO), establece que el riesgo está condicionado por la Peligrosidad (P), Exposición (E), y Vulnerabilidad (V).

$$\sum P_i * E_i * V_i$$

La Peligrosidad puede definirse como el conjunto de los aspectos naturales de un fenómeno que tienen incidencia en el daño esperado, y generalmente, en los métodos probabilistas, equivale a la probabilidad espacio-temporal de ocurrencia de un fenómeno de riesgo o potencialmente dañino y será objeto de este estudio. Por su parte, los factores de exposición y vulnerabilidad requieren de informaciones sobre aspectos de ingeniería y de valoración económica de los que no se dispone y por lo tanto, no serán abordados en este trabajo.

La cartografía de riesgos permite dividir el territorio según su grado de peligro potencial y depende de la disponibilidad de información de la zona, del nivel de detalle que se pretende lograr con el estudio. En la Tabla 4 se relacionan los diferentes tipos de mapas que pueden resultar del análisis de peligrosidad de una zona de estudio.

Los tipos de mapas mencionados en la tabla son secuenciales, lo que quiere decir que si se busca elaborar un mapa multirriesgo es necesario haber realizado los 5 mapas anteriores. En el caso que nos ocupa, descartadas las componentes de vulnerabilidad y exposición al riesgo, para abordar el análisis de la peligrosidad es necesario en primer lugar realizar el análisis de susceptibilidad de la zona estudiada, que responde a la probabilidad espacial de ocurrencia del evento (Ayala-Carcedo y Olcina 2002).

Tabla 4 Tipos de mapas de peligrosidad. (Gonzalez de Vallejo , y otros 2002)

Tipo de mapa	Contenido
1. Inventario	Localización y distribución espacial de los procesos actuales y pasados y/o de las zonas afectadas. Características de los procesos (tipo, magnitud, velocidad, intensidad, etc.).
2. Susceptibilidad	Zonas con diferente grado de susceptibilidad frente a la ocurrencia de un tipo de proceso con respecto a los factores que condicionan la zona.
3. Peligrosidad	Zonas con diferente grado de peligrosidad. Análisis de los factores desencadenantes y predicción espacial y temporal de los eventos.
4. Vulnerabilidad	Localización espacial de los elementos o zonas con diferente grado de vulnerabilidad.
5. Riesgo	Zonificación del territorio en base al riesgo o grado de riesgo
6. Multirriesgo	Zonificación en base al riesgo o grado de riesgo.

Según Ayala- Carcedo (2002), susceptibilidad es la *“Propensión o tendencia de una zona a ser afectada por movimientos de ladera por desestabilización o alcance, determinada a través de un análisis comparativo de factores condicionantes y/o desencadenantes, cualitativo o cuantitativo, con las áreas movidas o alcanzadas, análisis que se materializa normalmente en forma de mapa de susceptibilidad y suele suponer que el comportamiento futuro de la ladera seguirá las mismas pautas que hasta el presente.*

Para el caso de este estudio, se evaluará la susceptibilidad de la zona de estudio, ya que para continuar con el análisis de peligrosidad es necesario contar con datos multitemporales, en este caso con series de fotografías de referencia (al menos dos) o bien de un registro histórico con la suficiente resolución espacio-temporal, para poder realizar la predicción temporal de los eventos y en este caso no se cuenta con esta información disponible. Por otra parte, a pesar de que se cuenta con series de precipitaciones no es suficiente la información para establecer la frecuencia de los movimientos de ladera de una zona con un nivel de fiabilidad suficiente.

Los mapas de susceptibilidad pueden realizarse en base a mapas inventario y a mapas de factores; en donde se relacionan las áreas que sufren o han sufrido procesos de movimientos de ladera con respecto a las áreas en que confluyen determinados factores que condicionan los procesos en una determinada zona o región.

2.2.1. Análisis de susceptibilidad

El análisis de susceptibilidad puede ser abordado desde dos perspectivas: la determinista que se basa en leyes físicas y mecánicas universales de conservación de la masa y de la energía, con gran aplicación en análisis de taludes individuales; y la no determinista, basada en conocimientos empíricos sobre acontecimientos pasados para estimar el comportamiento de la zona a futuro (Irigaray y Chacón 2002).

Para este estudio se utiliza el enfoque no determinista o probabilista para la cartografía de la susceptibilidad, basándose en el inventario de movimientos de ladera que muestra la distribución de los fenómenos que se pretenden predecir, obtenido mediante la interpretación de fotografías aéreas y ortofotografías.

A partir de este inventario se pueden utilizar diferentes métodos para el correspondiente análisis: modelos basados en el análisis de actividad, modelos de densidad de movimientos, modelos basados en estadística bivariante, modelos basados en estadística multivariante. En este caso se utiliza el método de la matriz (DeGraff &

Romesburg, 1980; Irigaray. 1995), que permite establecer un índice de inestabilidad en una determinada zona. Este método no permite predecir la susceptibilidad a los movimientos de ladera en términos de probabilidad absoluta, aunque sí la inestabilidad potencial relativa a partir del análisis de factores condicionantes.

A partir de la combinación de las clases de los factores considerados se construye una matriz, la *matriz de toda la zona de estudio (1)*, en la que se representará el área total de cada combinación de factores. Por su parte, considerando el inventario de movimientos de ladera se calcula el área afectada por movimientos en cada combinación de factores, denominada *matriz de movimientos de ladera (2)*. Finalmente, la *matriz de susceptibilidad* se obtiene a partir de la división de (2) entre (1). Todas las combinaciones que no estén asociadas a movimientos de ladera se reclasifican con valor “0”, el resto tendrán valores que varíaran hasta 1, como probabilidad máxima. (Irigaray y Chacón 2002)

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

En la Tabla 5 se presentan los materiales utilizados en el desarrollo del proyecto.

Tabla 5 Materiales utilizados en el desarrollo del proyecto

Nº	ELEMENTO	CARACTERÍSTICAS
1	Planchas cartográficas 228IVD2, 228IVD4, 229IIIA3, 229IIIC1 y 229IIIC.	Escala 1:10000 Fuente: Geoportal- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) Año: 2008
2	Atlas Geológico de Colombia.	Escala 1:100000 Fuente: Servicio Geológico Colombiano Año: 2015
3	Series de precipitaciones estaciones: Santa Bárbara, La Vega San Juan, Gachalá, Tena, Las Minas.	Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) Año: 1972-2016
4	Modelo Digital de Elevación ALOS PALSAR: ALPSRP273810080 y ALPSRP273810070 para el año 2011 y los modelos ALPSRP052380080 y ALPSRP052380070 del año 2007	Fuente: Alaska Satellite Facility Resolución: 12,5 m Año: 2007 - 2011
5	Ortofotomosaico Plancha 228 Ortofotomosaico Plancha 229	Escala 1:10000 Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) – “Web Map Service WMS” del Banco Nacional de Imágenes. Año: 2015 Cobertura: 100% del área de estudio
6	Software Google Earth Pro: Imágenes Satelitales	Resolución: 4800 X 2701 pixeles fuentes de imagen: Landsat / Copernicus Año: 2016
7	Software ArcGIS 10.3	Desarrollo: ESRI

En el Diagrama 1 se presenta la metodología seguida en este trabajo.

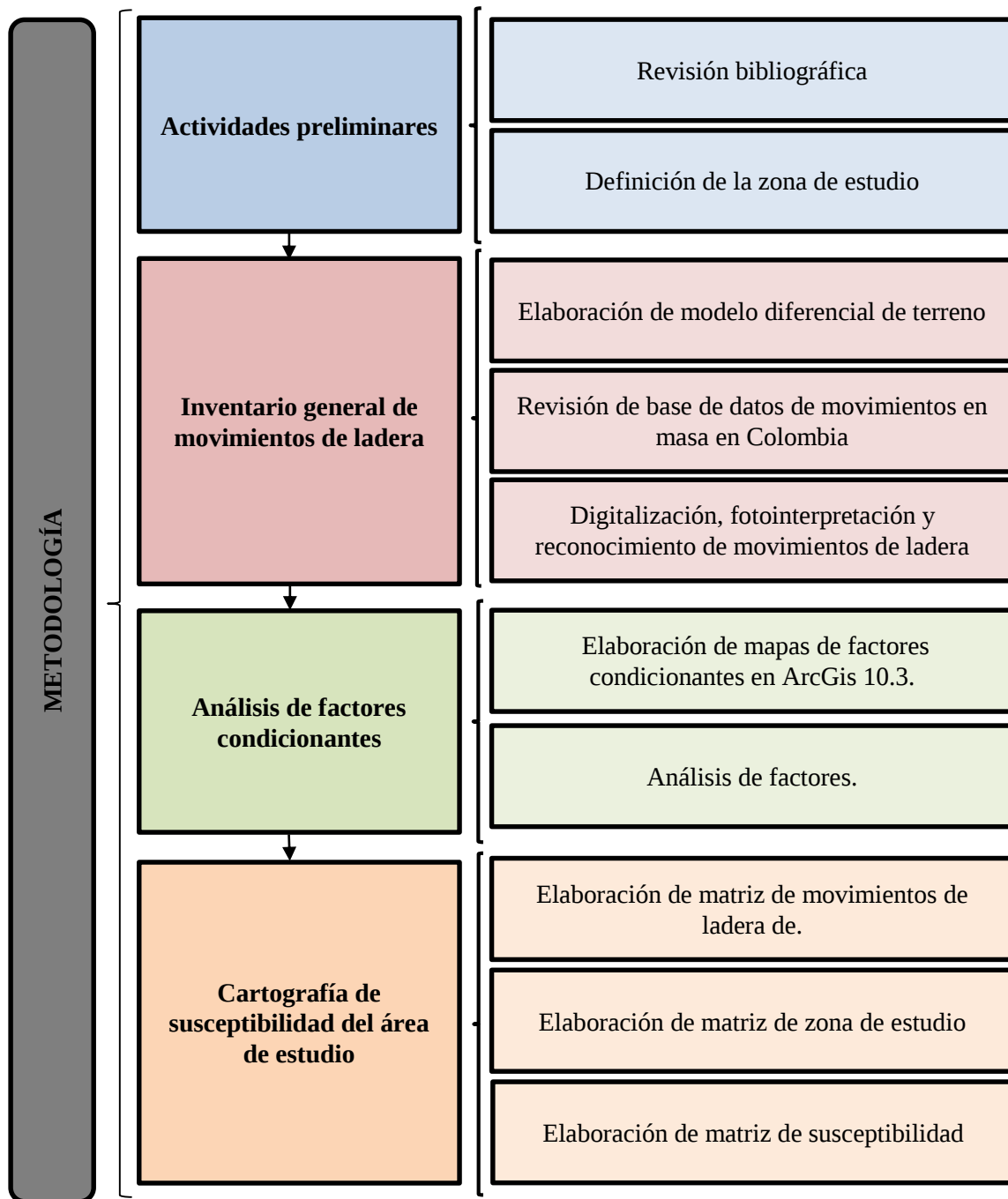


Diagrama 1 Metodología del trabajo

- **Actividades preliminares:**

Como actividad preliminar se realiza la selección de la zona de trabajo teniendo en cuenta que se encuentra en una región que históricamente ha presentado movimientos de ladera y así mismo se establece que la unidad de análisis definida para el estudio es el de subcuenca hidrográfica. (Río Murca).

Recolección y evaluación de pertinencia de material disponible: Colombia no cuenta con una base de datos generalizada que permita descargar la información de fotografías aéreas, orto fotografías, información climática, por lo que se realiza solicitud a diferentes entidades gubernamentales para la obtención de material disponible en la zona de estudio (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, Servicio Geológico Colombiano SGC, Corporación Autónoma Regional de la Región del Guavio CORPOGUAVIO, Alcaldía Municipal de Gachalá).

- **Inventario General de Movimientos de Ladera:**

Como primera medida para dar inicio al Inventario General de Movimientos de Ladera, se realiza el Modelo Diferencial de Elevación para identificar zonas con potencial de deslizamiento. La obtención de modelos diferenciales es una operación básica en AcrGIS que corresponde a una operación algebraica de sustracción o resta entre dos capas raster³. (MDE 2007-MDE2011)

También se realiza una búsqueda de información en las bases de datos de movimientos en masa de Colombia (Sistema de Información de Movimientos en Masa SIMMA y Unidad Nacional de gestión del Riesgo de Desastres UNGRD), así como una revisión en las noticias de prensa relacionadas con eventos de este tipo en la zona de estudio.

A partir de esta información, se realiza una digitalización, fotointerpretación y reconocimiento de movimientos de ladera, sobre los ortofotomosaicos de escala 1:10000 del WMS del Banco Nacional de Imágenes, apoyados por los inventarios previos.

Se realiza una verificación al inventario elaborado a partir del análisis de imágenes Landsat y Copernicus del software Google Earth Pro, con el fin de hacer un análisis posterior al de la orto y complementar la información obtenida o verificar información que en la ortofotografía no se pueda identificar claramente. Se hace una digitalización, fotointerpretación y reconocimiento sobre el software directamente y se hace un posterior cargue de esta información al software ArcGIS 10.3 para unificar la información de inventario recopilada.

Para la clasificación inventario de los fenómenos de remoción en masa se tuvo en cuenta la clasificación por tipo expuesta en el capítulo 2.1, pero no fue posible obtener la

³ Arc ToolBox/Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator

clasificación por actividad debido a la resolución espacial de la fotografía y al alcance de este trabajo.

- **Análisis de los factores condicionantes**

Se realiza la recopilación bibliográfica y caracterización de la zona de estudio con el fin de identificar las características más importantes y preponderantes de la zona de estudio. En este caso se realiza el análisis del componente geológico, de suelos, climatológico, hidrográfico y los derivados del Modelo Digital de Elevación: (Pendiente, Orientación, Curvatura).

Cada una de estos factores son transformados a una capa raster de tamaño de celda de 12,5m que es el tamaño de celda del modelo digital de elevación con el fin de tener una matriz individual de cada factor con el mismo número de celdas, así como su posterior reclasificación para establecer parámetros de clases en cada uno de los factores.

Seguido a esto se lleva a cabo la obtención de tablas cruzadas entre deslizamientos y factores y el análisis de correlación a partir del índice de Kolmogorov- Smirnov, de acuerdo al comportamiento de las frecuencias acumuladas en cada uno de los factores. Se seleccionan los factores que se van a incluir en el análisis de susceptibilidad.

- **Cartografía de susceptibilidad del terreno:**

Matriz de la zona:

Se realiza la combinación de los factores con la herramienta “Combine” en ArcToolbox para conseguir la primera matriz que indica la superficie ocupada por cada una de las combinaciones entre las clases de los factores seleccionados.

Matriz de deslizamientos:

Se elabora la matriz de deslizamientos a partir de una clasificación binaria del raster de movimientos de ladera en el que “0” es “Sin movimiento” y “1” es “Con evidencia de movimiento” para obtener una matriz de movimientos de ladera. En esta matriz se determinan la combinación de clases en las que se presenta algún movimiento de ladera.

Matriz de susceptibilidad

Se realiza la combinación de las dos matrices anteriores y se realiza la división de la matriz de deslizamientos con respecto a la matriz de la zona, obteniendo la probabilidad espacial de movimientos de ladera para cada una de las clases, y se identifican las áreas de muy baja, baja, moderada, alta, y muy alta susceptibilidad a los movimientos de ladera.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Inventario general de movimientos de ladera

Modelo Diferencial del Terreno

El modelo digital del terreno (MDT) utilizado para el análisis de la zona de estudio es el obtenido del satélite ALOS de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, operativo desde el año 2006 a través del sensor PALSAR con resolución espacial de 12,5 metros. Se realizó una composición de los modelos de elevación ALPSRP273810080 y ALPSRP273810070 para el año 2011 y los modelos ALPSRP052380080 y ALPSRP052380070 del año 2007, para darle cobertura total al área de estudio y tener dos valores de año diferentes. (Ilustración 8).

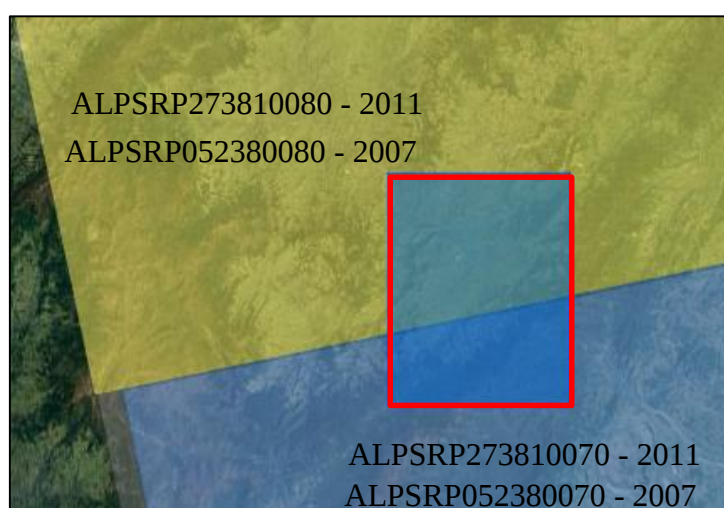


Ilustración 8 Modelos Digitales de Elevación con cobertura en el área de estudio Fuente: Alaska Satellite Facility.

Por otra parte, se elaboró el modelo diferencial a partir del MDE 2011 con respecto al MDE del 2007 para establecer unas áreas de referencia e identificar posibles deslizamientos en las áreas de descenso en el modelo, y permitir identificar de mejor manera los movimientos sobre la ortofotografía. Asimismo se ubicaron geográficamente los eventos reportados en las bases de datos (Ilustración 9). Sin embargo el resultado de este análisis no fue satisfactorio, debido a la resolución de los modelos (12,5 m) y su precisión vertical que no ha podido conocer, pero que no será muy alta al tratarse de modelos obtenidos a partir de imágenes de satélite. De hecho, se observan efectos de desplazamiento horizontal entre los modelos que se manifiestan en desplazamientos verticales en las distintas orientaciones del terreno y ocultan los procesos gravitacionales.

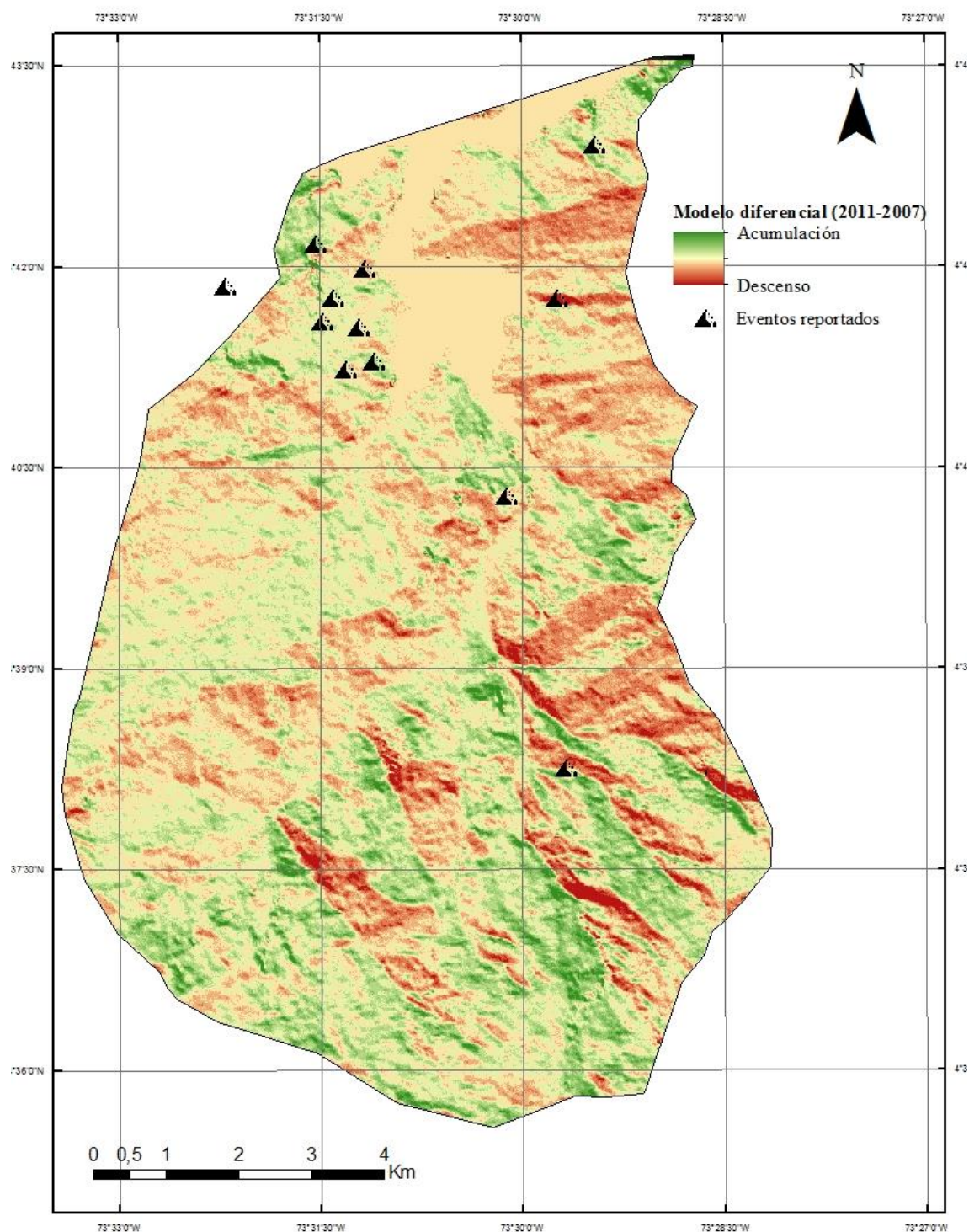
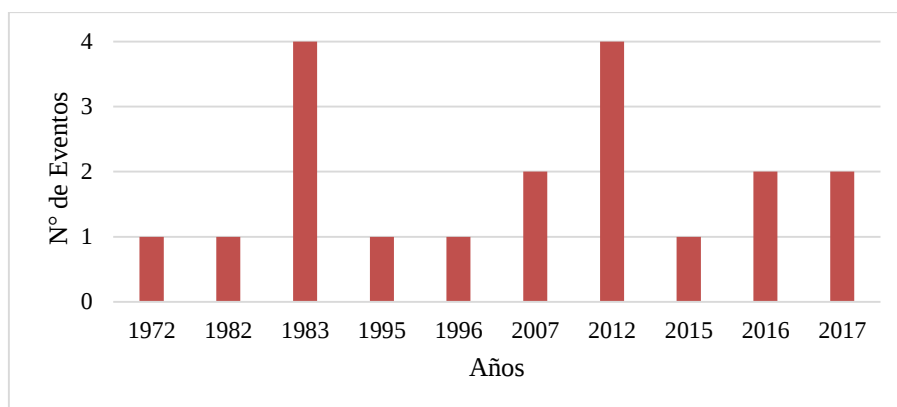


Ilustración 9 Modelo diferencial 2011 - 2017

Eventos de remoción en masa reportados

La Subdirección de Amenazas Geoambientales de Ingeominas estableció que durante el periodo de 1916 – 2002 en Colombia se presentaron 4290 eventos relacionados con procesos gravitacionales, de los cuales 339 correspondían al departamento de Cundinamarca, 31 de ellos catalogados como grandes deslizamientos (Ingeominas 2002).

La cuenca del río Guavio es una de las seis cuencas del departamento que presenta mayor concentración de fenómenos de remoción en masa (IGAC 2000) y el municipio de Gachalá en el periodo entre 1972 – 2017 tiene reportados ante las entidades de control 17 deslizamientos, y de acuerdo al catálogo de movimientos en masa del Ingeominas (2002) se tiene una relación de 278 muertos y 108 damnificados a causa de deslizamientos en el municipio. En la Gráfica 3 se presenta en la distribución por años de los eventos reportados.



Gráfica 3 Distribución de deslizamientos reportados en el municipio de Gachalá.

En la Tabla 6 se relacionan las noticias relacionadas con la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa presentados en el municipio que permiten determinar que los eventos reportados son menos de los que ocurren en la realidad.

Lo anterior permite afirmar que en el departamento, la mayor parte de los fenómenos que ocurren son de tipo "hidrogravitacional", ya que la relación estrecha entre la fuerza de la gravedad y el agua conforma el factor detonante de las situaciones catastróficas (Acosta y Ulloa 2002).

En el Departamento de Cundinamarca de los eventos que representan amenazas naturales el 38% son deslizamientos, el 17% socavamientos, 13% flujos, 11% reptación, y el restante entre avalanchas, acarcavamientos e inundaciones (Acosta y Ulloa 2002).

En la Tabla 7 se consolidan los resultados de los eventos de remoción en masa reportados en la base de datos nacionales en la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA) del Servicio Geológico Colombiano, clasificado según el tipo de movimiento registrado, que sirvió de apoyo a la localización, identificación fotointerpretación de los procesos que se describirá posteriormente.

Tabla 6. Noticias relacionadas con fenómenos de remoción en masa en el municipio de Gachalá (Fuente. El Tiempo)

FECHA DE NOTICIA	CATEGORÍA
3 de septiembre de 1992	Emergencia invernal
17 de octubre de 1994	Derrumbes
12 de septiembre de 1996	Por construcción de la represa
1 de febrero de 1997	Condiciones permanentes
14 de julio de 1997	Emergencia invernal
26 de septiembre de 1998	Emergencia invernal
17 de enero de 1999	Emergencia invernal
16 de enero de 1999	Emergencia invernal
25 de mayo de 1999	Amenaza Sísmica
20 de septiembre de 2003	Reboses en embalse
16 de septiembre de 2003	Reboses en embalse
14 de septiembre de 2003	Alerta en el Guavio
16 de octubre de 2003	Reboses en Embalse
22 de junio de 2004	Emergencia invernal
17 de abril de 2004	Emergencia invernal
19 de febrero de 2005	Emergencia invernal
16 de mayo 2017	Calamidad pública
16 de mayo 2017	Intensas Lluvias
03 de Junio 2016	Emergencia invernal
21 de mayo 2017	Alerta Naranja

Tabla 7 Eventos reportados en bases de datos oficiales

FUENTE	EVENTO	AFECTADOS	FECHA
SIMMA	DESLIZAMIENTO	17	01/07/1968
SIMMA	DESLIZAMIENTO	5	02/05/1972
SIMMA	DESLIZAMIENTO	0	01/07/1982
SIMMA	DESLIZAMIENTO	0	29/04/2007
SIMMA	DESLIZAMIENTO	0	29/04/2007
SIMMA	FLUJO	0	13/07/2009
SIMMA	DESLIZAMIENTO	2	15/01/2012
SIMMA	DESLIZAMIENTO	0	10/04/2012
UNGRD	DERRUMBE	0	19/05/2012
UNGRD	CRECIENTE DE QUEBRADA	0	26/06/2015
UNGRD	DESLIZAMIENTO	0	23/05/2016
UNGRD	DESLIZAMIENTO	120	13/05/2017
UNGRD	CRECIENTE SUBITA	0	07/06/2017

Digitalización, fotointerpretación y reconocimiento de los movimientos de ladera

El inventario de procesos gravitacionales se realiza a partir de la digitalización, fotointerpretación y reconocimiento de ortofotomosaicos de escala 1:10000 de las planchas 228 y 229 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) del año 2011 en el

paquete ArcGIS 10.3 de ESRI. y la verificación posterior en imágenes del paquete de Google Earth Pro del año 2016.

Se cartografiaron 252 eventos de los cuales 218 corresponden a deslizamientos (87%), 21 eventos son de tipo flujo (8%) y 13 son Avalanchas (5%). El área correspondiente a estos eventos es de 68,2 Ha. (Ilustración 10)

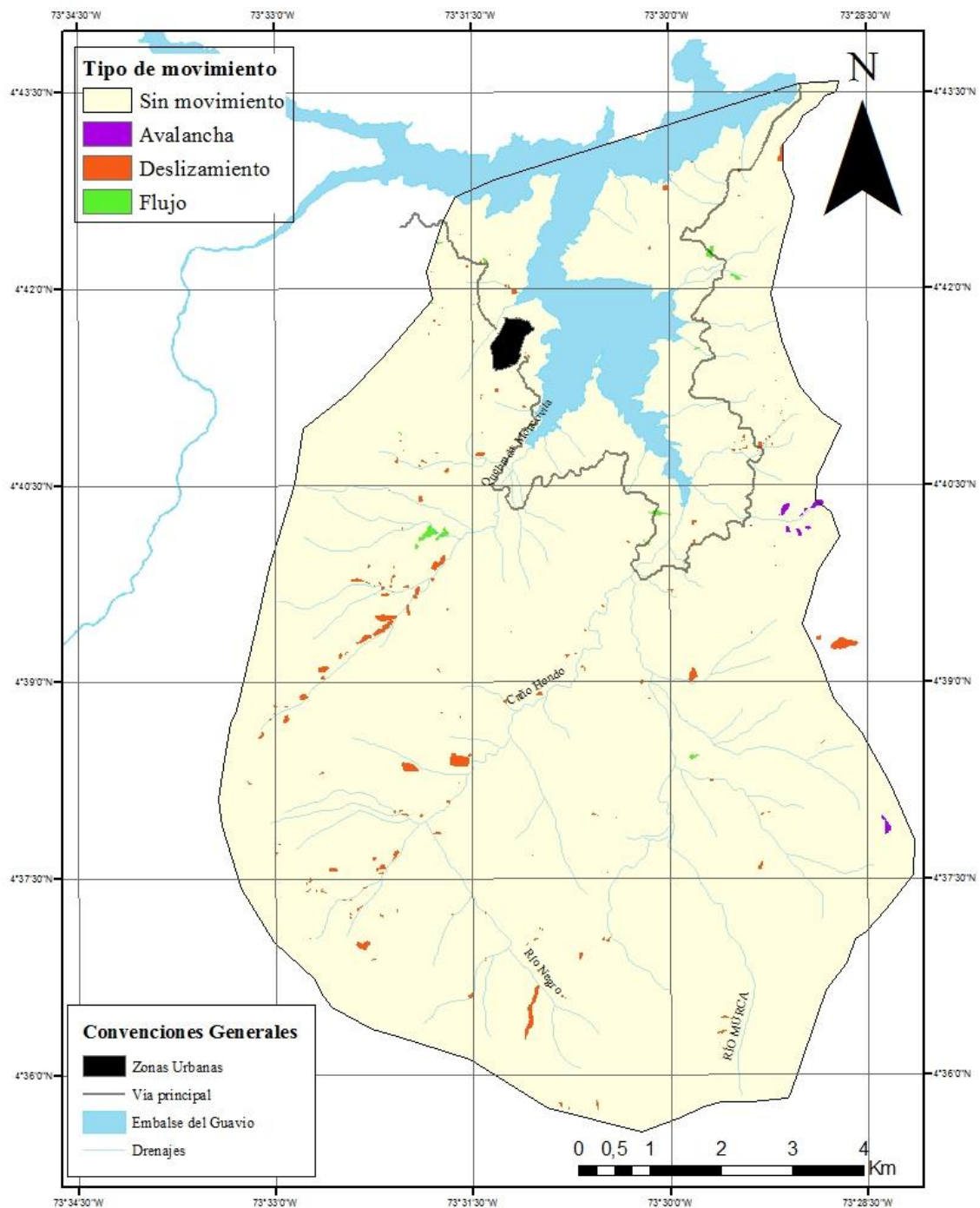


Ilustración 10 Inventario de fenómenos de remoción en masa.

A lo largo del cauce de la Quebrada Moncovita se identificaron la mayor cantidad de deslizamientos, identificando superficies de rotura bien definidas, que pueden obedecer directamente a procesos hidrogravitacionales, en los que el efecto del agua incrementa la inestabilidad del terreno.

En la mayoría de los casos se identificó el escarpe principal del deslizamiento pero no fue posible reconocer las características de la superficie de rotura para clasificarlos en traslacional o rotacional. En algunos casos se pudo hacer una aproximación inicial a la determinación de tipo de cada deslizamiento, en la Ilustración 11 se presentan dos ejemplos de los movimientos de deslizamientos identificados, en la ilustración “a” se identifica un deslizamiento en el que se reconoce el escarpe principal, la cabeza del deslizamiento, se reconocen grietas transversales en el pie de la masa deslizada, por lo que se puede indicar que es un deslizamiento de tipo rotacional.

En la ilustración “b”, se aprecia un deslizamiento incipiente, que no tiene un tiempo de desarrollo muy antiguo, ya que se conserva la cobertura vegetal, sin embargo, se aprecia un escarpe inicial con superficie de ruptura plana y flancos laterales que limitan el deslizamiento que puede indicar que sea de tipo traslacional.

En la Ilustración 12 se presenta un ejemplo de avalancha identificado en el cauce del Río Murca y en la Ilustración 13 se presenta un ejemplo de flujo identificado en la vía Gachalá- Ubalá, en el que se puede identificar que el movimiento continúa su curso normal a pesar de la presencia de la vía.

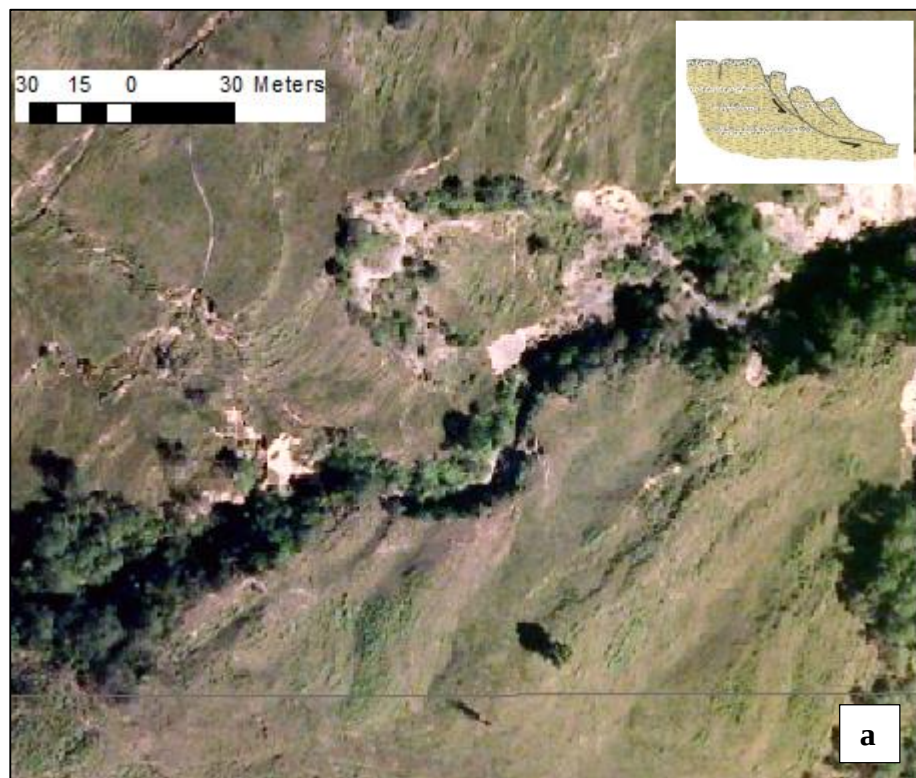


Ilustración 11 Deslizamientos. a. Rotacional b. Traslacional



Ilustración 12 Avalancha en el cauce del río Murca



Ilustración 13 Flujo en la vía Gachalá-Ubalá

4.2. Análisis de factores condicionantes

Descripción de factores condicionantes

Los factores condicionantes analizados en el presente trabajo fueron escogidos de acuerdo a la disponibilidad de información de los entes nacionales, departamentales y municipales consultados.

Se realizó la cartografía de los factores: Precipitación, Altitud, Pendiente, Orientación, Unidades Cronoestratigráficas, Uso del suelo, Tipo de suelo y Curvatura.

- **Precipitación:** Este factor puede comportarse como factor desencadenante o como factor condicionante. Como factor desencadenante se analizan eventos concretos de precipitación que sean a causa directa y conocida de un evento múltiple de deslizamientos o de un deslizamiento concreto. Para el caso del presente estudio se evaluará como factor determinante empleando la precipitación media de una serie de años (1972-2016). El mapa utilizado para el correspondiente análisis es el mostrado previamente en la Ilustración 4. Se utilizaron 4 clases de precipitación: 1500 -2000 mm, 2000-2500 mm. 2500-3000 mm, 3000-3500 mm.
- **Altitud:** La distribución de altitud en la zona de estudio se encuentra entre 1500 m.s.n.m y 3500 m.s.n.m. presentando incremento de altitud hacia el suroriente de la zona de estudio. Se utilizaron 4 clases para representar la altitud: 1500 -2000 msnm, 2000-2500 msnm. 2500-3000 msnm, 3000-3500 msnm.(Ilustración 14)
- **Pendiente:** La pendiente se define como el gradiente de inclinación de la línea de máxima pendiente tangente al terreno en un punto respecto a la horizontal. El mapa de pendientes se calcula a partir del mapa de elevaciones clasificado en las siguientes clases: 0-5° (pendiente muy suave), 5-15° (pendiente suave), 15-20° (pendiente moderada), 20-30° (pendiente fuerte), 30-45° (pendiente muy fuerte vertical o subvertical) y 45°- 75 (pendiente vertical o subvertical) (Ilustración 15). A partir de él se determinó el porcentaje de distribución por cada una de estas clases. (Gráfica 4)
- **Orientación:** La orientación de las laderas se obtiene igualmente a partir de la elevación, e indica el ángulo que forma la línea de máxima pendiente de un elemento de la superficie del terreno con respecto al Norte geográfico, medido

en sentido de las agujas del reloj. Se representa en la Ilustración 16, clasificado en 9 categorías.

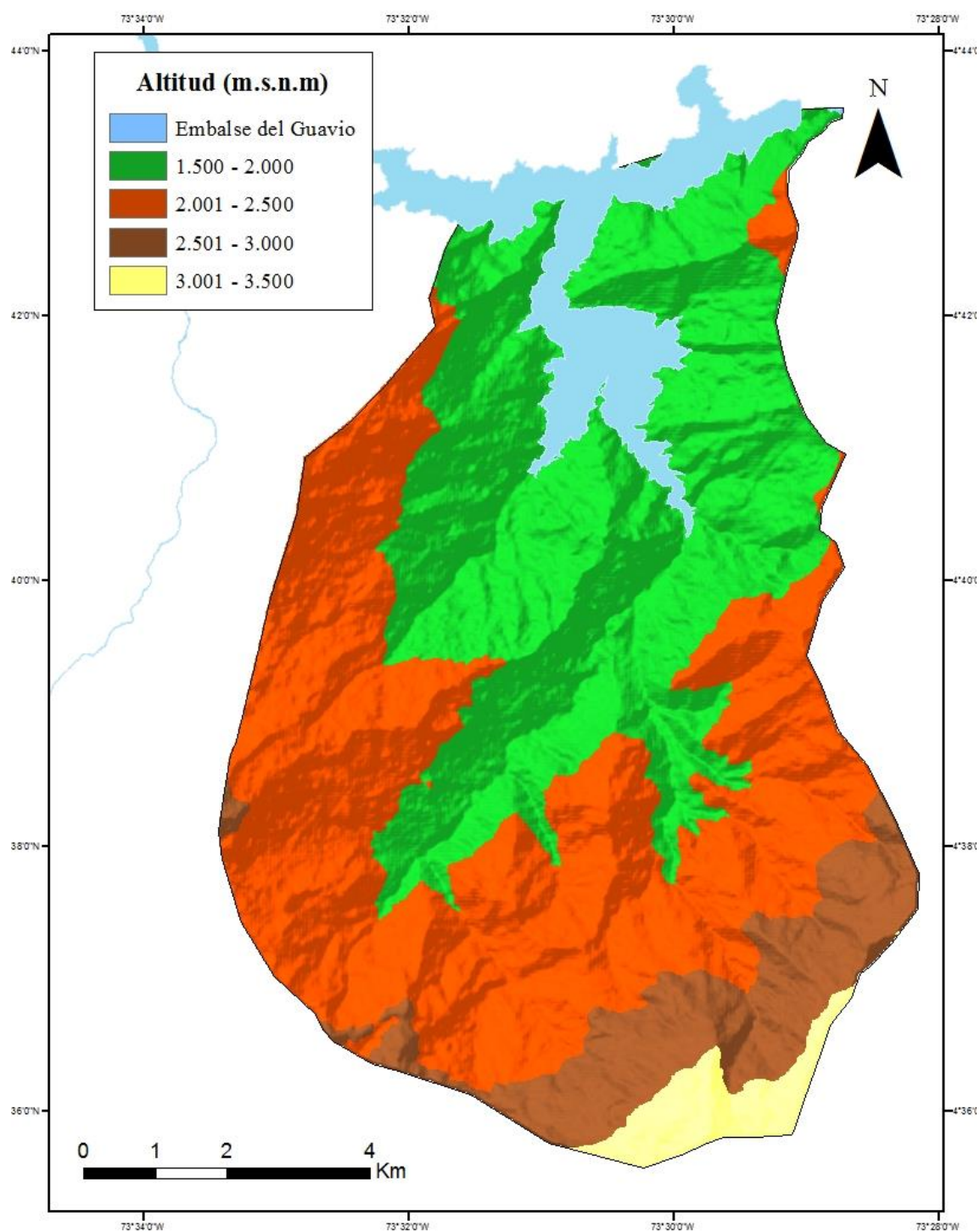


Ilustración 14 Distribución de altitud en la zona de estudio

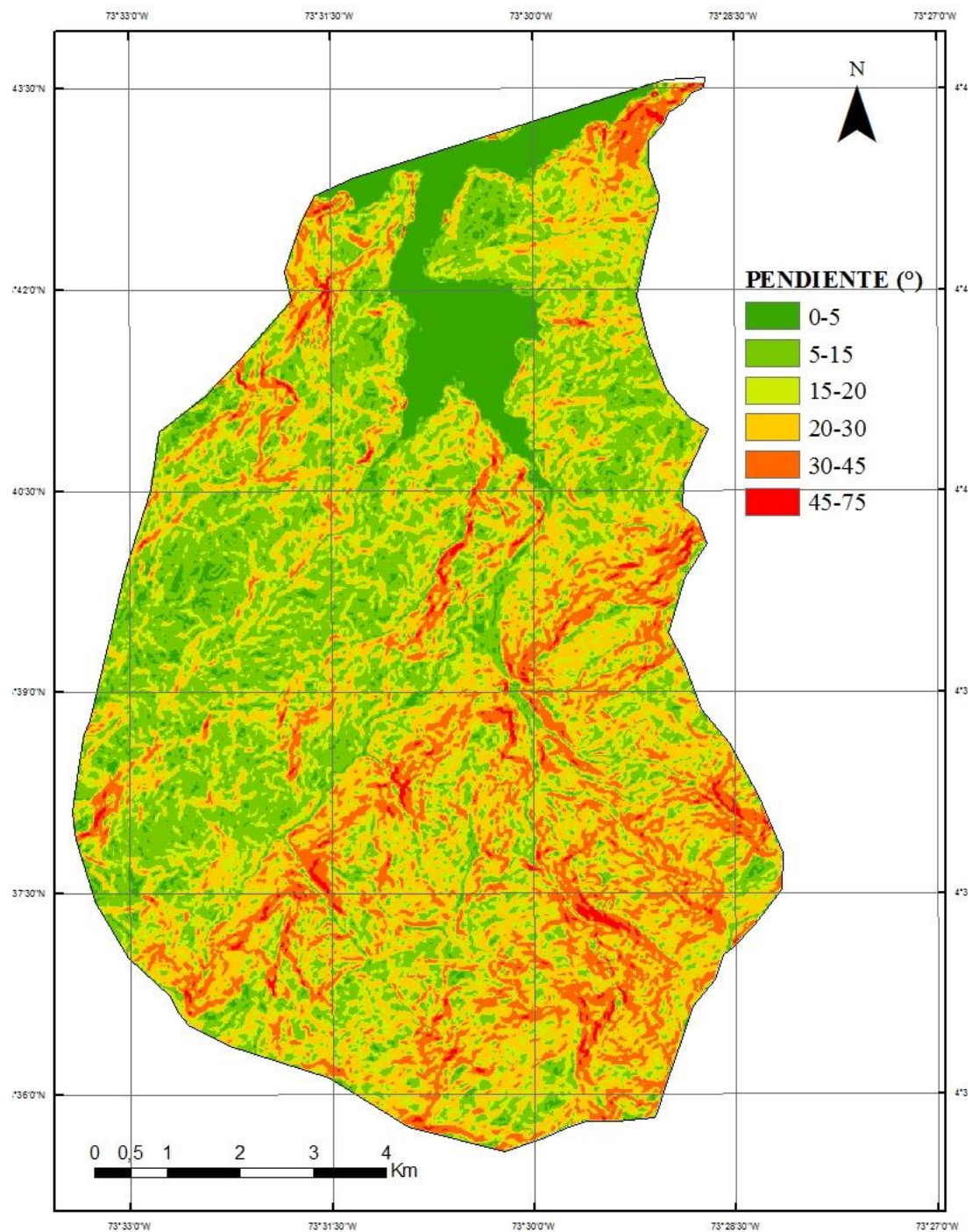
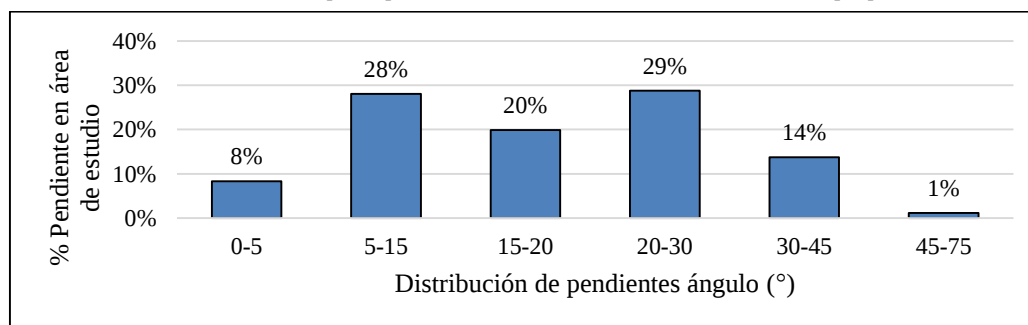


Ilustración 15 Mapa de pendientes en la zona de estudio. Elaboración propia



Gráfica 4 Distribución por clases de pendientes

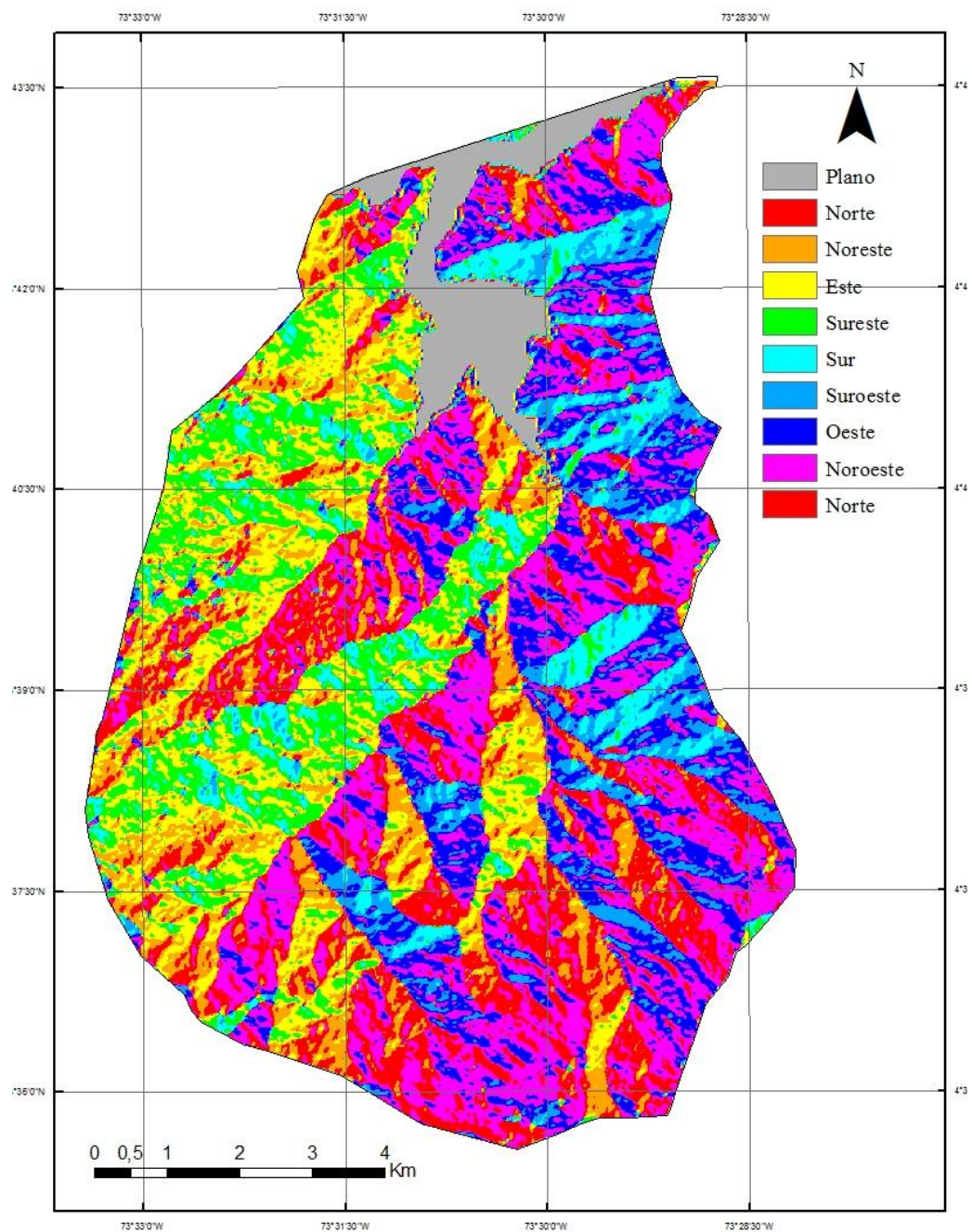
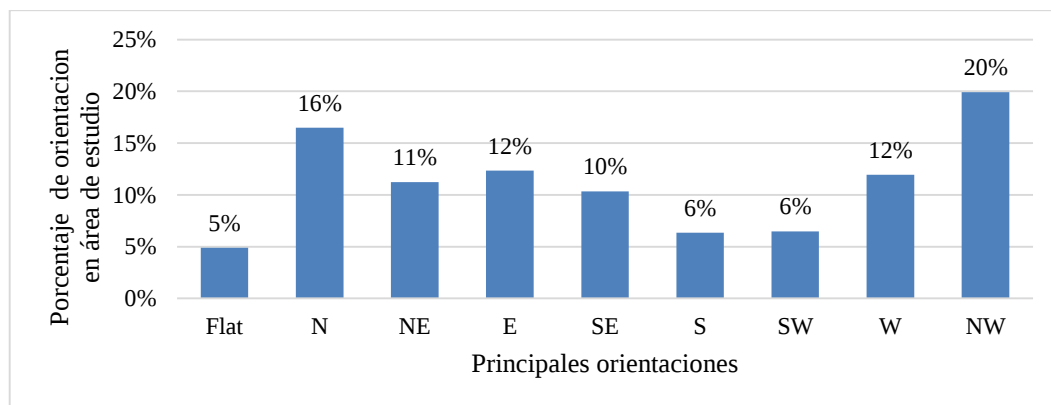


Ilustración 16 Mapa de orientaciones de la zona de estudio



Gráfica 5 Distribución de orientaciones

- Unidades Cronoestratigráficas: Se presentan en la zona de estudio 5 clases (Ilustración 17)

La unidad DC-Sctm, En ella se originan las zonas con topografía más escarpada: filos, laderas muy empinadas, cañones muy profundos, donde se forman las cuchillas más altas, entre los 2000 y 3000 m.s.n.m. Comprende el 18,1% del área de la zona de estudio.

La unidad b1-Sctm, en donde se observan buenos afloramientos en la localidad de Palomas, en las veredas de La Vega de San Juan y el Diamante, en donde se ubica la zona mineralizada de Gachalá (Servicio Geológico Colombiano 2013). Cubre el 8,2% del total de la zona de estudio.

La formación b1-u1, corresponde al 4,8% de la zona de estudio.

La unidad b1k1-Sm es la unidad que ocupa mayor área en la zona de estudio con 68,5%.

La unidad Qc (depósitos coluviales) en la zona de estudio solo representa el 0,4%. En esta zona se encuentran predominantemente unidades en alto estado de erosión y afectados por movimientos en masa, en contraposición con la zona al oriente del área de estudio en el que los depósitos presentados corresponden a procesos aluviales (Servicio Geológico Colombiano 2013).

- Tipo de suelo: Se utilizaron 9 clases para este factor. (Ilustración 18)
- Uso de suelo: En la Tabla 8 se presenta la proporción de uso del suelo en la zona de estudio y en la Ilustración 19 la distribución correspondiente.
- Curvatura: Este factor permite identificar si la superficie es cóncava, convexa o plana. Se reclasificaron en 5 clases. (Ilustración 20)

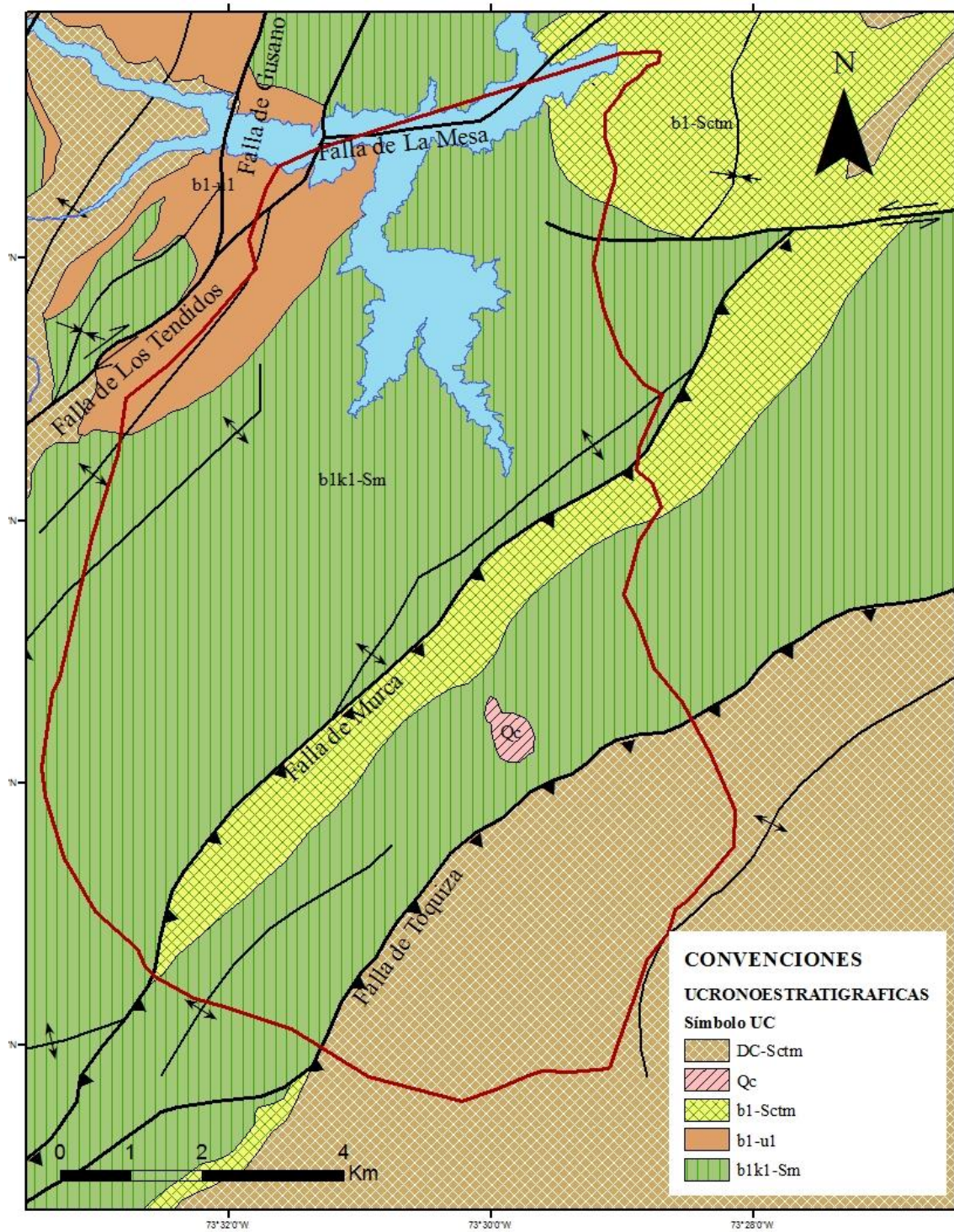


Ilustración 17 Detalle geológico de la zona de estudio. Ajustado de Atlas Geológico Colombiano, 2015. Fuente: (Gómez , y otros 2015)

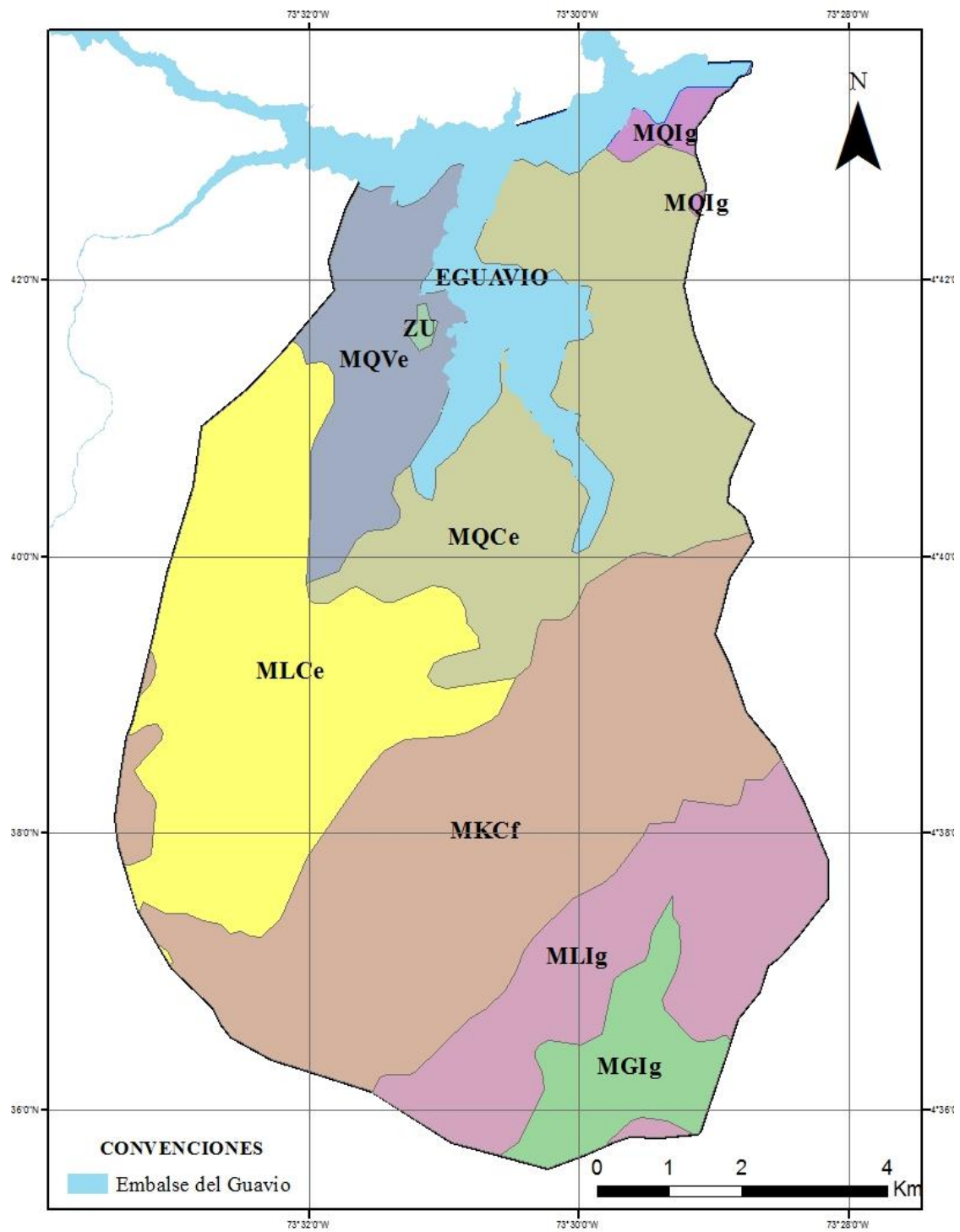


Ilustración 18 Unidades de suelos de la zona de estudio. Elaboración propia. Fuente: (IGAC 2000)

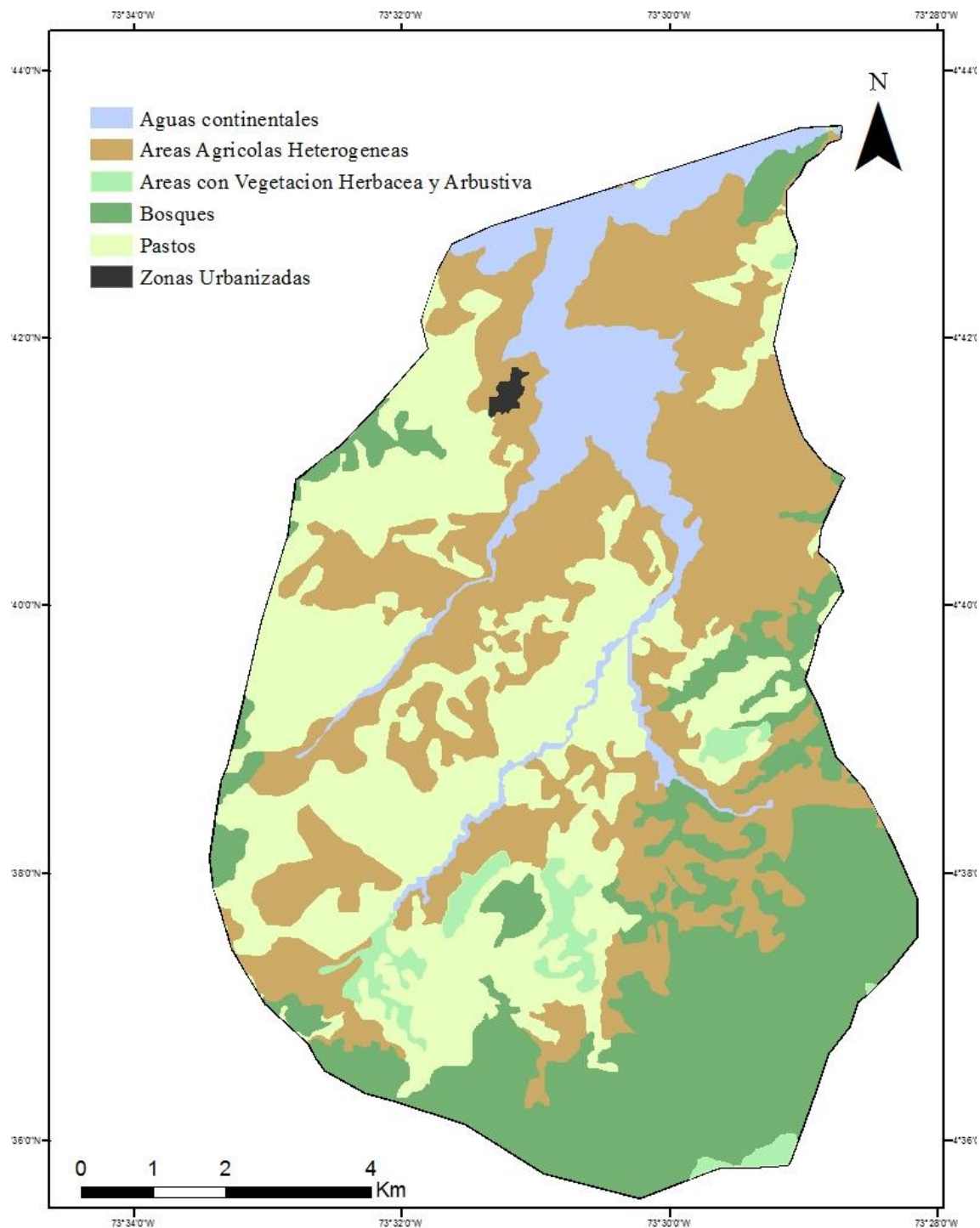


Ilustración 19 Distribución de uso de suelo (IGAC, 2007)

Se puede apreciar que en la zona de estudio se presentan tres coberturas principales relacionadas con áreas para la actividad agrícola, seguida por pastos y bosques, ya que las principales actividades económicas del municipio de Gachalá son la agricultura y la ganadería.

Tabla 8 Proporción de uso del suelo en la zona de estudio. (IGAC, 2007)

Cobertura	Clase	Porcentaje
Aguas Continentales	Ríos	9%
	Cuerpos de Agua Artificiales	
Áreas Agrícolas Heterogéneas	Mosaico de Cultivos, Pastos y Espacios Naturales	34%
	Mosaico de Pastos con Espacios Naturales	
	Mosaico de Cultivos, Pastos y Espacios Naturales	
Áreas con Vegetación Herbácea y Arbustiva	Vegetación Secundaria o en transición	3%
	Herbazal Denso de Tierra Firme con Arbustos	
	Arbusto denso	
	Arbusto abierto	
Bosques	Bosque Fragmentado con Pastos y Cultivos	24%
	Bosque Denso Alto de Tierra Firme	
	Bosque Denso Bajo de Tierra Firme	
	Bosque Fragmentado con Vegetación Secundaria	
Pastos	Pastos Limpios	24%
	Pastos Arbolados	
	Pastos Enmalezados	

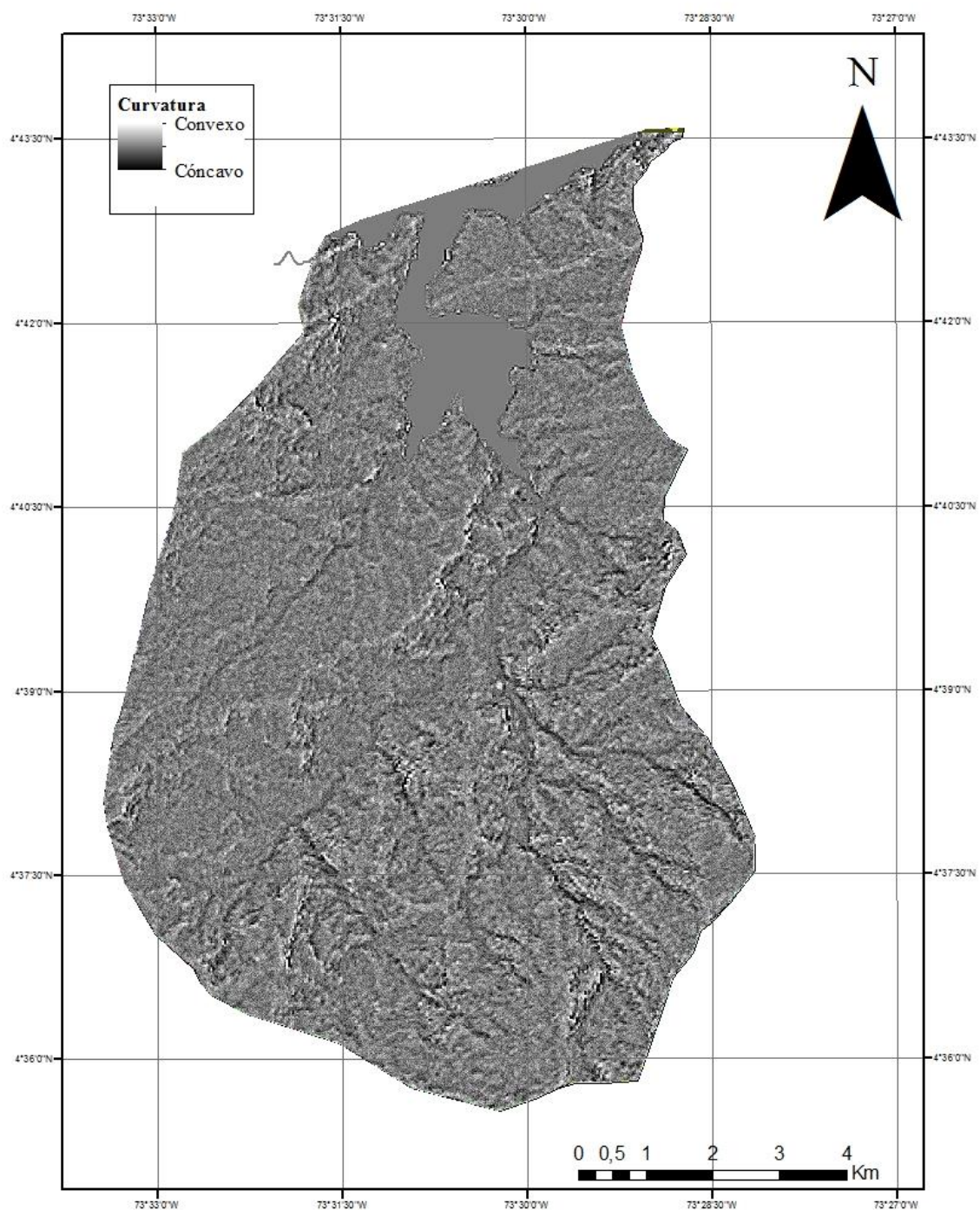


Ilustración 20 Mapa de cobertura de la zona de estudio

Coefficientes de correlación de factores condicionantes

El análisis de correlación del índice de Kolmogorov Smirnov (KS) indica la diferencia en el comportamiento de las frecuencias acumuladas relativas de los factores en cada una de sus clases, en la zona afectada por los movimientos en masa respecto del total de la

zona. Lo que se mide es la diferencia entre las frecuencias acumuladas entre las series (zona afectada y total), lo que se puede ver gráficamente como la diferencia entre las dos curvas resultantes. El coeficiente de Kolmogorov-Smirnov es la máxima diferencia entre las frecuencias acumuladas de las dos series y se expresa en tanto por 1 o tanto por ciento.

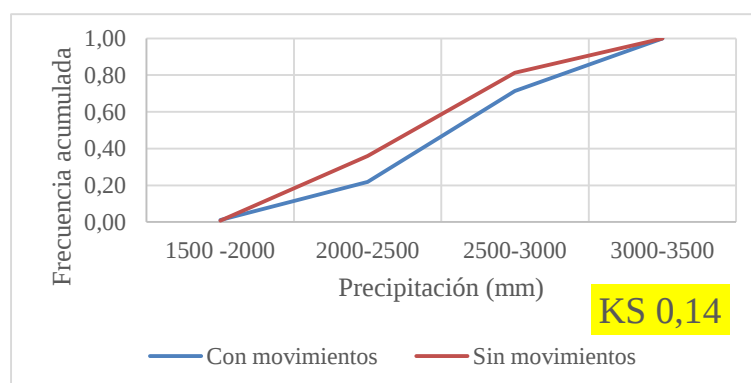
Un mayor coeficiente como expresión de una mayor diferencia entre las distribuciones, significa una mayor influencia del factor en la ocurrencia de movimientos de ladera.

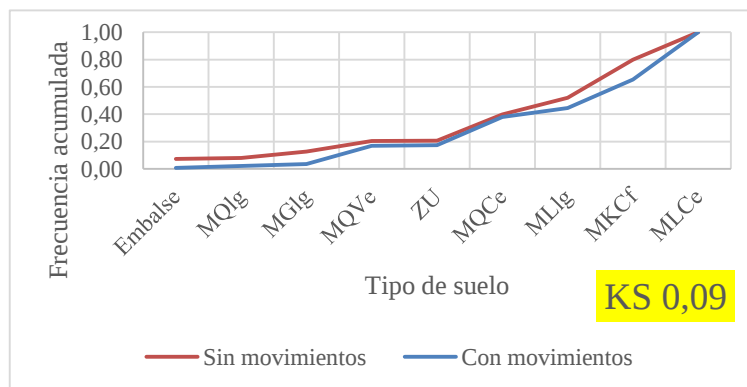
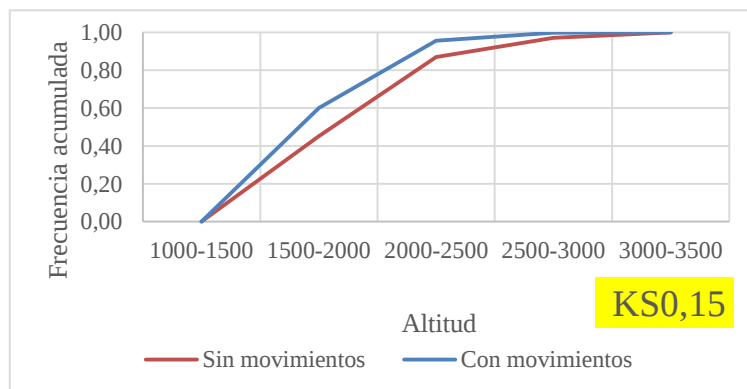
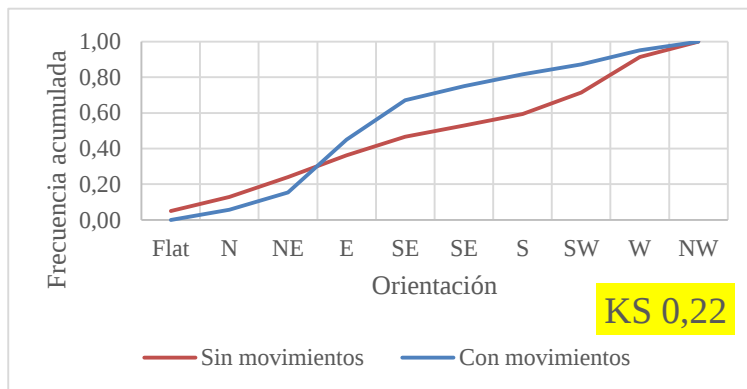
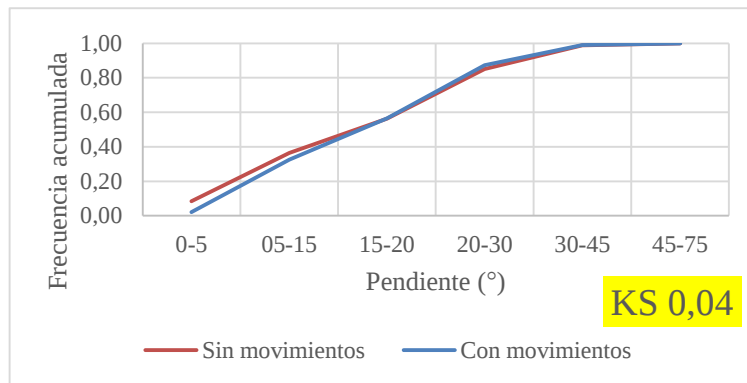
En la

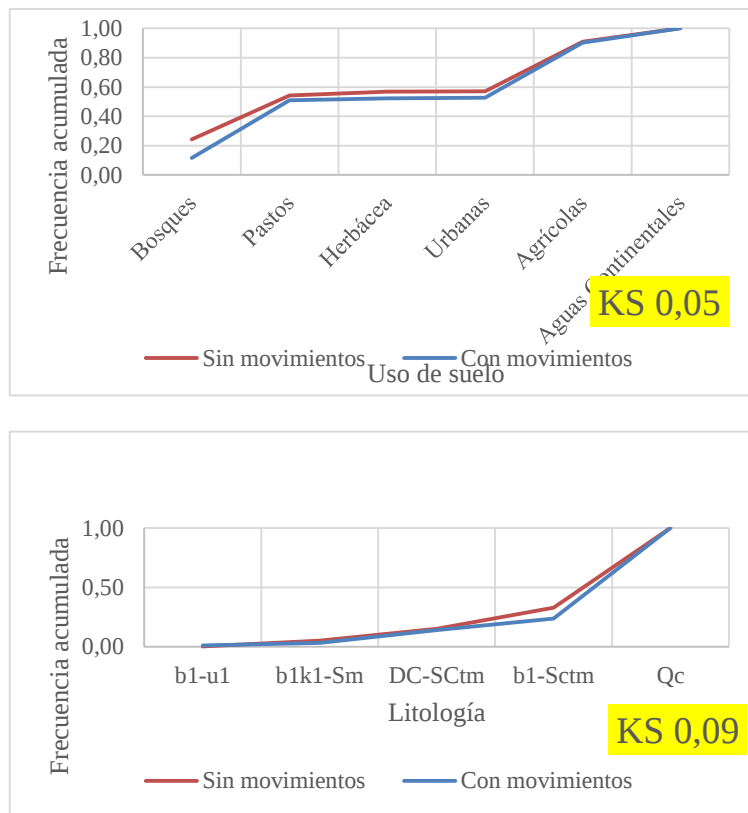
Gráfica 6 se presentan los resultados del índice de los factores condicionantes evaluados con su coeficiente de KS. Los coeficientes obtenidos no presentan valores muy elevados, si acaso algo mayores en la altitud, la orientación y las precipitaciones, pero sin mayores diferencias entre sí, por lo que se utilizaron los 8 factores para la construcción de las matrices. Esto puede obedecer a que en algunos casos, como en el de la geología, la litología puede categorizarse como uniforme a pesar de que se encuentren diversas unidades, lo que puede no generar un valor representativo en el coeficiente evaluado.

Es el caso también de la pendiente en donde no se pueden identificar valores representativos del coeficiente debido a la ocurrencia de eventos de deslizamiento en su mayoría en la zona de estudio, no se llevó a cabo un análisis diferenciado por tipo de movimiento debido a que los movimientos de flujo y avalanchas inventariados eran muy pocos, y los movimientos mayoritarios, deslizamientos con una cierta componente de flujo, que además incluyen a los depósitos o zonas de acumulación, no precisan de pendientes muy fuertes para su generación. Tampoco se observa correlación con la curvatura, presentándose movimientos en todas clases desde las formas cóncavas (zonas bajas de las laderas) hasta las convexas (zonas altas de las laderas).

A partir de este análisis también se puede tener un indicio acerca de las clases en las que se presenta mayor densidad de deslizamientos, que posteriormente serán comparados con los resultados obtenidos con la cartografía de susceptibilidad. Se identificaron las clases entre 2000 y 2500 mm de precipitación, en pendientes generalmente inferiores a 15°, orientación predominante hacia el Este, entre 1500 y 2000 m.s.n.m., en suelos afectados por erosión hídrica laminar en grado ligero, bien drenados, con texturas finas a medias, con usos Urbanos, Agrícolas y Pastos, donde no hay gran cantidad de vegetación que controle los movimientos de ladera, en unidades de depósitos coluviales, de material parental predominantemente arcilloso.







Gráfica 6 Prueba de Kolmogorov – Smirnov para factores condicionantes

4.3. Análisis de susceptibilidad

En la Ilustración 21 se presenta el resultado del análisis de susceptibilidad de la subcuenca del río Murca, vertiente al embalse del Guavio.

Se han establecido cinco clases de susceptibilidad en función del porcentaje de terreno de cada combinación de factores, afectado por movimientos. (El Hamdouni 2001 modificada).

Muy Baja <0,5%

Baja 0,5-2%

Moderada 2-5%

Alta 5-10%

Muy Alta >10%

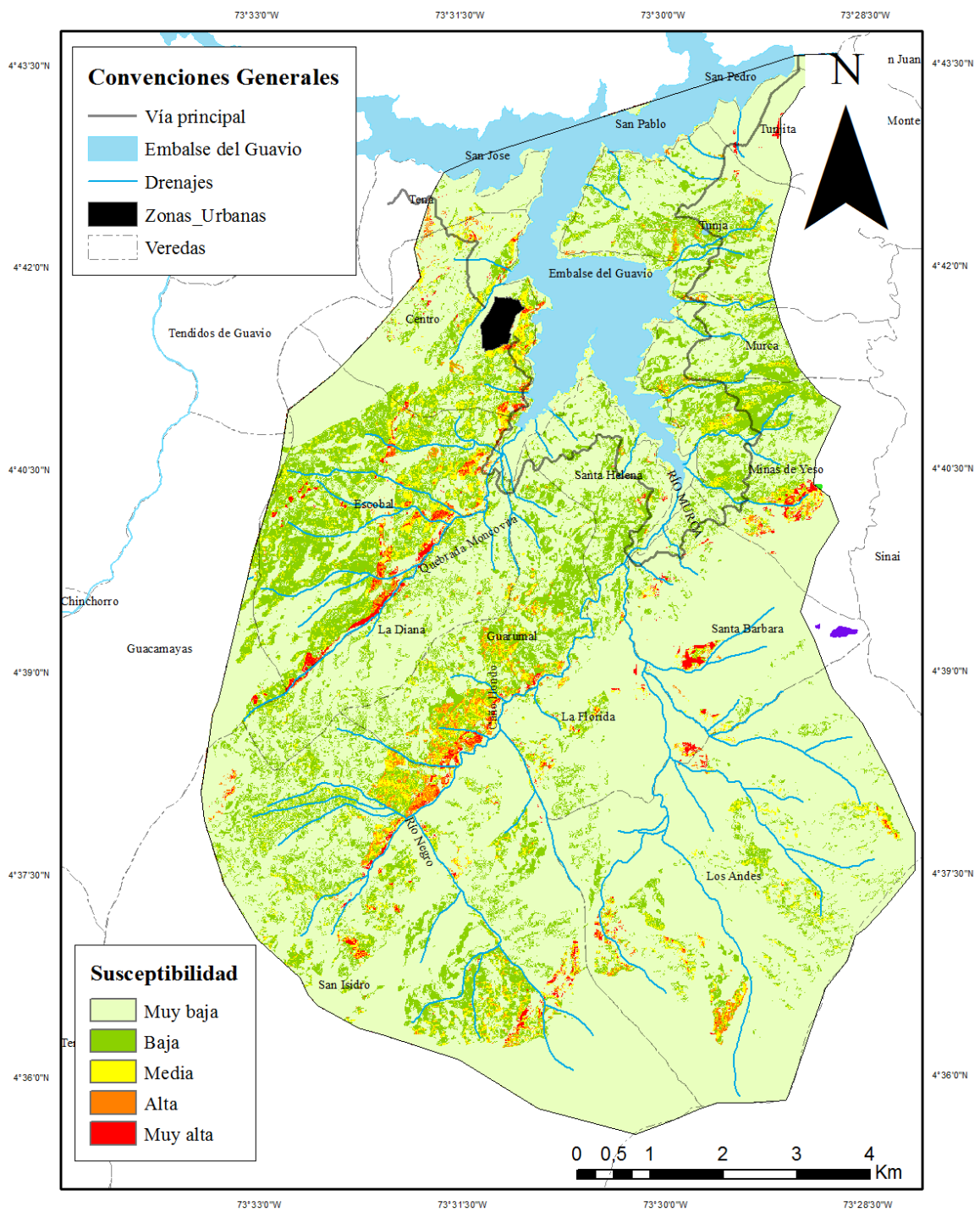
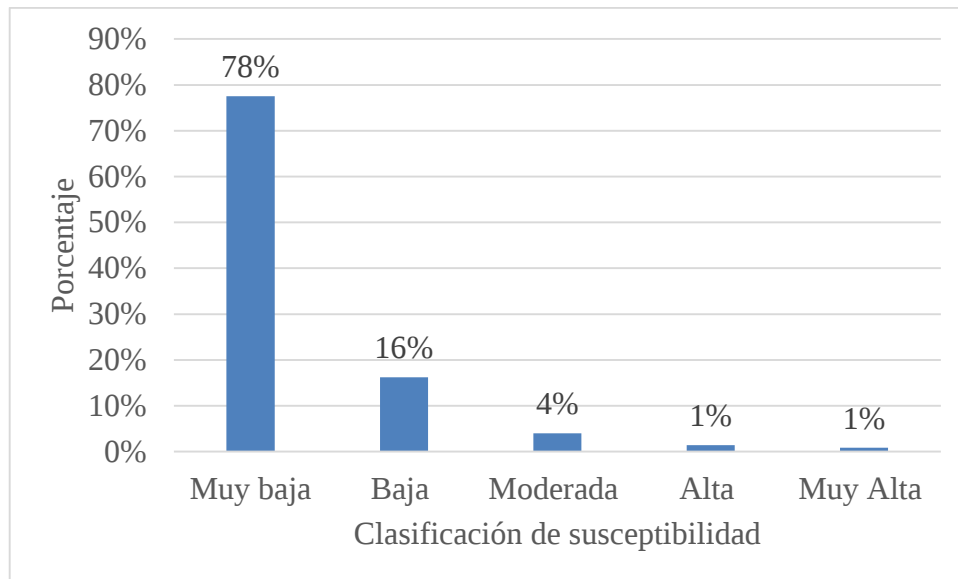


Ilustración 21 Análisis de susceptibilidad Subcuenca del río Murca



Gráfica 7 Distribución de susceptibilidad

A partir del mapa de susceptibilidad es posible identificar 6 zonas que presentan la susceptibilidad más alta a presentar movimientos de remoción en masa. La primera ubicada en la vereda *Las Minas de Yeso* que se encuentra ubicada sobre la unidad litológica *b1-Sctm* de la formación Santa Rosa. Seguida a esta se encuentra la zona sobre la vereda Santa Bárbara donde también se presenta susceptibilidad Alta y Muy alta.

Las zonas en donde se evidencia mayor susceptibilidad son las que se encuentran en cercanías a la Quebrada Moncovita, y al caño Hondo en el que se identifica que uno de los principales factores condicionantes para los movimientos en esta zona es el relacionado con el uso del suelo. En esta zona predominan los Usos de tipo Agrícola y de Pasto en los que la cobertura vegetal es muy reducida y permite que el área se comporte de manera más activa a este tipo de movimientos. Las veredas que se encuentran en esta zona son El Escobar, Guarumal y Centro.

Esta zonificación de susceptibilidad en esa área corresponde con la unidad cronoestratigráfica *b1k1-sm* es la formación Lutitas de Macanal del piso valanginiano (Cretácico inferior), que cubre el 69% del área de estudio. Tiene predominancia arcillosa con intercalaciones significativas de arenitas y limolitas, que tienen la capacidad de almacenar gran cantidad de agua y así mismo incrementar su propio peso.

Estas zonas coinciden con la orientación de la pendiente (SE), lo que puede tener que ver con la estructura geológica (buzamiento de las capas) y recaen directamente sobre el cauce de los dos ríos nombrados incrementando la cantidad de sedimentos y

contribuyendo a la acumulación de los mismos en el embalse. A pesar de que esta es la parte del área de estudio que presenta menores valores de precipitación, su valor promedio mensual, así como los eventos de lluvias torrenciales incrementan la cantidad de agua que se puede acumular en estas áreas. De hecho, se observa una mayor concentración de los deslizamientos en las zonas en torno a los cauces de los ríos. Es bien sabido que el incremento en la pendiente ocasiona una gran cantidad de movimientos en masa, sin embargo en el presente estudio no se observa un aumento de la susceptibilidad a medida que aumenta la pendiente y de hecho se produce una mayor concentración a pendientes bajas (por debajo de 15°). Esto se puede deber a que la mayor parte de movimientos responde a tipologías de deslizamiento-flujo que no se producen en grandes pendientes, y además a que el análisis llevado a cabo incluye tanto las zonas de rotura como los depósitos o zonas de acumulación, en los que la pendiente se reduce. Para un análisis más detalle, se debería diferenciar ambas zonas del movimiento. En cuanto a la distribución de las pendientes, que se ha modelizado mediante la curvatura, y que en principio debería haber puesto de manifiesto las zonas de acumulación de agua que antes se indicaban, tampoco se observan resultados claros, por lo que en futuros trabajos se deberían analizar modelos hidrológicos más avanzados. De cualquier forma, los resultados de este análisis de pendientes y curvatura hacen pensar en una falta de definición, no tanto de resolución, del modelo digital del terreno empleado.

La zona hacia el sur oriente, que pertenece directamente al cauce del río Murca es la que presenta mayores valores de pendiente, sin embargo también coincide con contar con gran cobertura boscosa que permite disminuir el efecto erosivo y devastador de la precipitación en estas zonas.

Es por esto que se pueden identificar las zonas de la quebrada Moncovita como la del caño Hondo como prioritarias de atención dentro de la zona de estudio, y la zona perteneciente al río Murca, como zona de control y seguimiento.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

El inventario de movimientos de ladera en la zona de estudio corresponde a 252 eventos de los cuales 218 corresponden a deslizamientos (87%), 21 eventos son de tipo flujo (8%) y 13 son Avalanchas (5%). El área correspondiente a todos estos eventos es de 68,2 ha. Esto corresponde al 2% del total de la zona.

El deslizamiento de mayor tamaño inventariado es de 41.593 m², el menor de 39 m², y en promedio de 2489 m². Con respecto a las avalanchas el tamaño promedio del inventario elaborado es de 4333 m², el máximo de 13196 m² y el más pequeño de 72 m². Para los flujos, el de mayor tamaño inventariado fue de 24.496 m², el de menor tamaño 103 m², y en promedio de 3945 m².

Los factores condicionantes evaluados en el estudio corresponden a precipitación, pendiente, orientación, geología, altitud, uso del suelo y tipo de suelo. Del análisis de estos factores se desprende que los movimientos de ladera en la subcuenca del río Murca, vertiente al embalse del Guavio se presentan en mayor medida en regímenes de precipitación entre 2000 y 2500 mm; en usos de suelo Agrícolas y de Pastos (Ganadería) debido a la baja cantidad de cobertura vegetal presente en el área.

Sin embargo, el factor pendiente no aparece un factor que condicione tanto la generación de estos movimientos, ya que la mayor cantidad de deslizamientos se presentan en pendientes entre el 0 y el 15%. Tampoco se observa una correlación clara con la distribución de las pendientes o curvatura, y los movimientos aparecen en toda la gama de pendientes desde cóncavas (partes bajas) o convexas (parte altas), a pesar de que visualmente se observe una cierta concentración en las zonas en torno a los ríos.

La unidad geológica que presenta mayor cantidad de movimientos es la *b1k1-sm* de la formación Lutitas de Macanal, con una gran cantidad de arcilla en su composición, aunque este factor tampoco muestra una correlación clara con los movimientos de ladera y por lo tanto, capacidad discriminadora, debido a la importante homogeneidad litológica de las distintas unidades diferenciadas.

El índice de correlación de Kolmogorov- Smirnov no presentó una información relevante en el caso de este estudio debido a la homogeneidad de parámetros en algunas áreas, por lo que se recomienda aplicarlo en estudios que abarquen un área mayor, y en algunos casos, se requerirá comprobar la calidad de los mapas de factores (MDT) y mejorarla en su caso.

Respecto al análisis de susceptibilidad, el 11% de las combinaciones de cada una de las clases de la “Matriz de la zona de estudio” corresponde a combinaciones afectadas por movimientos de ladera.

La distribución de susceptibilidad en la subcuenca del río Murca está dada por el 78% en clasificación Muy baja, 16% baja, 4% Moderada, 1% Alta y 1% muy alta.

La susceptibilidad a movimientos de ladera en la zona de estudio tiene una tendencia de comportamiento respecto al plano de falla de la falla de Murca y en menor medida a la falla de Toquiza, y al Anticlinal del Escobar.

Como conclusión general, el estudio de susceptibilidad a partir de métodos no deterministas es una estrategia de bajo costo para continuar con la evaluación y gestión del riesgo en el país, sin embargo es necesario continuar trabajando en el levantamiento de información primaria, fotografías aéreas, datos hidrometereológicos, reconocimiento geológico y geomorfológico a escalas más detalladas y el reporte adecuado y oportuno de eventos relacionados con movimientos de remoción en masa.

5.2.Trabajos futuros

Comenzando por lo apuntado en las conclusiones se requerirá en el futuro testear y, en su caso, mejorar la calidad de la información empleado, especialmente lo relativo al modelo digital de elevaciones. La realización de vuelos fotogramétricos en Colombia, con motivo de la realización del nuevo Catastro multipropósito, puede permitir en breve disponer de estos modelos. A partir de ellos, se pueden acometer algunos modelos más avanzados como los hidrológicos, para estudiar el efecto de la acumulación de agua, como factor desencadenante, en determinadas zonas de las laderas.

Por otra parte, se recomienda que sea validado el modelo de susceptibilidad levantado con campañas en el campo e incrementar la fiabilidad del producto entregado, así como con el empleo de inventarios multitemporales o mediante muestreos del inventario independientes para la determinación de la susceptibilidad y de su validación. Además, en la medida de que se disponga de inventarios más elaborados y de factores más fiables, se plantea la utilización de métodos multivariantes para evaluar la susceptibilidad.

Finalmente, la posibilidad de contar con inventarios multitemporales, permitirá abordar estudios de peligrosidad, de gran importancia en regiones como la estudiada y en general en Colombia, donde los eventos de remoción en masa ocurren de forma continua.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta , J, y Carlos Ulloa. *Memoria Geológica del Departamento de Cundinamarca. Memoria Explicativa*. Bogotá: Ingeominas, 2002.
- Alcántara , I. «Landslides: ¿deslizamientos o movimientos del terreno? Definicion, clasificaciones y terminologia.» *Investigaciones Geográficas*, 2000: 7-25.
- Ayala-Carcedo. «Una reflexión sobre los mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera, su naturaleza, funciones, problemática y límites.» En *Mapas de susceptibilidad a los movimientos de ladera con técnicas SIG. Fundamentos y aplicaciones en España.*, de F.J Ayala- Carcedo, 7-20. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2002.
- Ayala-Carcedo, F.J, y J Olcina. *Riesgos Naturales*. Barcelona: Ariel, 2002.
- Carpena, R, y otros. «Análisis de riesgos asociados a las infraestructuras viarias de la diputación provincial de jaén.» *IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Santander, 2017.
- Chacón, J, y otros. «Movimientos de ladera en la costa de almuñecar y su entorno.» *Geogaceta*, 2016: 87-80 .
- CORPES. *Mapa de amenazas geológicas por remoción en masa y erosión del Departamento de Cundinamarca*. Bogotá: Ingeominas, 1998.
- Corpoguavio. *Plan de gestión ambiental regional PGAR 2013-2023*. Corpoguavio, 2013.
- Ecoforest. *Diagnóstico y plan de ordenamiento y manejo de la cuenca aportante del río Guavio, fases diagnóstico, prospectiva y formulacion*. Cundinamarca: Corpoguavio, 2005.
- El Hamdouni. *Tesis: Estudio de movimientos de ladera en la cuenca del río Ízbor mediante un SIG: contribución al conocimiento de la relación entre tectónica activa e inestabilidad de vertientes*. Universidad de Granada, 2001.
- Fernandez, T, c Irigaray, J Chacón, y R- El Hamdouni. «Validación de un método de cartografía de movimientos de ladera y susceptibilidad mediante un S.I.G. en un sector de los ríos Guadalfeo e Izbor (Granada).» *VI Simposio Nacional sobre taludes y laderas inestables*. Granada, 1997. 51-63.
- Fernandez, T, C Irigaray, R. El Hamdouni, y J Chacón . «Methodology for landslide susceptibility mapping by means of a GIS. Application to the Contraviesa Area (Granada, Spain).» *Natural Hazards*, 2003: 297-308.

- Gómez , Jorge, Nohora Montes, Álvaro Nivia, y Hans Diederix. *Atlas Geológico de Colombia*. Colombia: Servicio Geológico Colombiano, 2015.
- Gonzalez de Vallejo , Mercedes Ferrer, Luis Ortuño , y Carlos Oteo. *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educacion. Prentice Hall , 2002.
- Hungr, Oldrich, y Luciano Picarelli. «The Varnes classification of landslide types, an update.» *Landslides*, 2014.
- IGAC. *Estudio general de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Cundinamarca : mapas temáticos*. Bogotá: IGAC, 2000.
- Ingeominas . *Catálogo Nacional de Movimientos en Masa* . Bogotá: Subdirección de Amenazas Geoambientales , 2002.
- INGEOMINAS. *Mapa geológico de Colombia*. Colombia: Ministerio de minas y energía, 1988.
- Irigaray , C, y J Chacón. «Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante SIG.» (Instituto Geológico y Minero de España) 2002: 21-36.
- . *Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante SIG*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2002.
- Irigaray, C, T Fernandez, R. El Hamdouni, y J Chacón. «Evaluation and validation of landslide-susceptibility maps obtained by a GIS matrix methods: eample for the Betic Cordillera (southern Spain).» *Nat Hazards*, 2006.
- Irigaray, C, T Fernández, R. El Hamdouni, y J Chacón. «Verification of landslide susceptibility mapping: a case study.» *Earth surface processes and landforms*, 1999: 537-544.
- Irigaray, Clemente, y Chacón. «Métodos de análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante SIG.» 2002: 21-36.
- Jimenez, Jorge. *Tesis: Análisis de la susceptibilidad a los movimientos de ladera mediante un SIG en la cuenca vertiente al embalse de Rules, Granada*. Granada: Universidad de Granada, 2005.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. *Guía técnica para la formulación de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014.

- Mozas-Calvache, A.T, J Perez-García, y T Fernández. «Monitoring of landslide displacement using UAS and onontrol methods based on lines.» *Landslindes*, 2017.
- Servicio Geológico Colombiano . *Las amenazas por movimientos en masa de Colombia. Una visión a escala 1:100000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano , 2017.
- Servicio Geológico Colombiano. «Geología de la plancha 229. Gachalá.» Bogotá, 2013.
- Tarbuck, E, y F Lutgens. *Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson. Prentice Hall, 2005.
- UNGRD. *Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, una estrategia de desarrollo 2015-2025*. Bogotá: Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, 2016.
- Varnes, D.J. «Landslide hazard zonation: a review of principles and practices.Commission on Landslides of the IAEG, UNESCO.» *Natural Hazards Series 3*, 1984: 63.