

Incorporación del factor de riesgo climatológico como componente dentro de los criterios de inversión para infraestructura vial terciaria.

Angélica Johana Mora Pedroza y Oscar Fernando Velandia Ardila

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Civil

Director

Ing. Sandra Rocío Villamizar Amaya, Ph.D.

Profesor Asistente EICI

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2021

Dedicatoria

Dedico de manera especial y con todo mi corazón mi proyecto a mis padres, hermanos y sobrina, pues ellos fueron el principal cimiento para la construcción de mi vida profesional; sentaron en mí la base de responsabilidad y deseos de superación pues sus virtudes y sus corazones me llevan a admirarlos cada día más.

A mi abuelo Rosendo, quien desde el cielo me dio el impulso necesario contribuyendo en mí incondicionalmente para poder culminar esta nueva etapa.

A mi novio y su familia por su amor y calidez ofrecidos, quienes con sus palabras de aliento no me dejaban decaer y sembraron en mí la perseverancia a cumplir con mis ideales.

En especial, a mi compañero de proyecto Oscar Velandia y tutora de tesis Sandra Rocío Villamizar que sin su ayuda, guía e intelecto no hubiese sido posible culminar este proyecto.

A mis compañeros y amigos quienes sin esperar nada a cambio compartieron todos sus conocimientos y habilidades durante el transcurso de toda la carrera para lograr que este sueño se haga realidad.

A la universidad, la cual no fue solo una base de conocimiento del campo en la que me he visto inmersa, si no para lo que concierne la vida y mi futuro.

Angélica Mora

Dedicatoria

A Dios por llenarme de sabiduría y permitirme cumplir este sueño.

*A mi abuela Rosa María, que con su amor, ternura y bondad me apoyó en cada momento difícil,
y con su ejemplo me demostró que cualquier problema se puede solucionar. Te amo tanto.*

*A mis padres Rosa Ardila y Carlos Velandia que hicieron de mí una persona correcta con
buenos valores. Agradecerles por el apoyo económico que me brindaron para poder alcanzar esta
meta. Esto es gracias a ustedes.*

*A mi compañera y amiga Angélica por el empeño y apoyo que dedicó para poder culminar de
manera excelente este trabajo. A mis amigos Isabel, Fabián y Camilo quienes me brindaron su
amistad y cariño durante estos 5 años.*

*A mis profesores, especialmente a la profesora Sandra, quien me aportó con su conocimiento y
experiencia herramientas para mi vida profesional.*

Oscar Fernando Velandia Ardila

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander y a los profesores por los conocimientos y herramientas que nos brindaron en cada semestre para nuestra vida profesional. Así mismo a los compañeros que con los que compartimos en esta etapa.

A nuestra directora la ingeniera Sandra Rocío Villamizar por las enseñanzas aprendidas, por la motivación diaria que nos brindó, porque sin su ayuda no fuese sido posible culminar este trabajo.

Al área metropolitana de Bucaramanga y a la UIS por proveer la información necesaria para el desarrollo de esta investigación.

Angélica Mora & Oscar Velandia

Tabla de contenido

Introducción.....	15
1. Objetivos.....	17
1.1. Objetivo General.....	17
1.2. Objetivos Específicos	17
2. Marco teórico.....	18
2.1. La precipitación como factor detonante de deslizamientos y su afectación en la infraestructura vial	18
2.1.1. Intensidad-duración (ID)	19
2.1.2. Precipitación acumulada (E).....	21
2.1.3. Intensidad de lluvia normalizada- Duración (I_{MAPD})	22
2.1.4. Lluvia diaria para el día del evento (R).	24
2.2. Factores condicionantes para la ocurrencia de deslizamientos.	25
2.2.1. Capacidad de infiltración.....	26
2.2.2. Pendiente	27
2.2.3. Cobertura y uso del suelo	29
2.2.4. Litología.....	30
2.2.5. Geomorfología.....	33
2.2.6. Distancia a fallas o discontinuidades estructurales.....	35
2.3. Análisis de riesgo.....	36
2.3.1. Análisis de amenaza	37
2.3.1.1. Métodos cualitativos.....	37

2.3.1.1.1 Metodología heurística.	37
2.3.1.1.2 Metodología Mora-Vahrson.	38
2.3.1.2. Métodos cuantitativos.....	38
2.3.1.2.1 Metodología estadística	38
2.3.1.2.2 Metodología determinística	42
2.3.2. Análisis de vulnerabilidad	43
3. Contexto del área de estudio.....	46
3.1. Descripción zona de estudio	46
3.2. Información de precipitación para el área de estudio	51
3.3. Información de deslizamientos ocurridos en Colombia según base de datos SIMMA	54
3.3.1. Deslizamientos registrados en Santander	54
3.4. Red vial existente en el área de estudio	56
4. Metodología.....	57
4.1. Estrategia para el cálculo de riesgo	57
4.2. Análisis de descriptores de precipitación	58
4.3. Factores condicionantes.....	61
4.3.1. Pendiente	62
4.3.2. Uso y Cobertura.....	63
4.3.3. Infiltración (permeabilidad).....	64
5. Resultados.....	64
5.1. Ecuación para el cálculo del riesgo climatológico a la infraestructura vial	64
5.2. Piloto de cálculo de riesgo climatológico para el área de estudio	65
5.2.1. EMAP como índice descriptor de precipitación (Pi).....	65

5.2.2. Susceptibilidad a deslizamientos de los factores condicionantes	66
5.2.3. Amenaza por precipitación en el área de estudio	68
5.2.4. Vulnerabilidad	70
5.2.5. Riesgo climatológico a la infraestructura vial en la zona de estudio.....	71
6. Conclusiones.....	74
Referencias	76
Apéndices	90

Lista de Tablas

Tabla 1. Ecuaciones para el cálculo de umbrales de intensidad-duración relacionados con la ocurrencia de deslizamientos.....	20
Tabla 2. Umbrales de lluvia acumulada	22
Tabla 3. Umbrales de intensidad normalizada- duración.	23
Tabla 4. Umbrales de lluvia diaria.....	24
Tabla 5. Susceptibilidad a deslizamientos por infiltración.....	26
Tabla 6. Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la clasificación de pendiente propuesta por Mora- Vahrson.	28
Tabla 7. Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la clasificación de pendiente propuesta por Van Zuidam.....	28
Tabla 8. Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la clasificación de pendiente propuesta por Jaime Suárez.....	28
Tabla 9. Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la clasificación según cambios ocurridos en uso y cobertura del suelo	29
Tabla 10. Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la clasificación de uso y cobertura del suelo propuesta por Jaime Suárez.....	30
Tabla 11. Clasificación general de materiales litológicos.	30
Tabla 12. Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la litología según clasificación propuesta por Jaime Suárez.	31
Tabla 13. Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la litología según clasificación propuesta por Mora – Vahrson.	32

Tabla 14. Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la litología según clasificación propuesta por el Servicio Geológico Colombiano.....	32
Tabla 15. Ejemplos de unidades geomorfológicas según origen.....	34
Tabla 16. Susceptibilidad de unidades geomorfológicas ante deslizamientos.	34
Tabla 17. Susceptibilidad a deslizamientos según espaciamiento entre fallas	36
Tabla 18. Ecuaciones de métodos de equilibrio limite.	43
Tabla 19. Clasificación de la vulnerabilidad propuesta por DGRDS	44
Tabla 20. Factores de vulnerabilidad propuestos por Juan Pablo Londoño.	44
Tabla 21. Clasificación de los impactos sociales, temporales y de pérdidas.....	45
Tabla 22. Susceptibilidad de vulnerabilidad de infraestructura ante deslizamientos.	45
Tabla 23 Descriptores de precipitación	60
Tabla 24. Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la reclasificación de pendiente propuesta.....	62
Tabla 25. Susceptibilidad a deslizamientos según la reclasificación de uso y cobertura de suelo	63
Tabla 26. Susceptibilidad a deslizamientos según la reclasificación de permeabilidad.....	64

Lista de Figuras

Figura 1. Rumbo, buzamiento y orientación de fallas	35
Figura 2. Tipos de discontinuidades	36
Figura 3. Relación deslizamientos L y factor condicionante w	40
Figura 4. Porcentaje de área según su pendiente	49
Figura 5. Deslizamientos en el inventario SIMMA para Santander en resolución anual.....	55
Figura 6. Deslizamientos en el SIMMA para la zona de estudio en resolución anual	55
Figura 7. Panel de ráster de descriptores de precipitación	61
Figura 8. Superficies de los descriptores de precipitación EMAP 1 y EMAP 2	65
Figura 9. Distribución porcentual del riesgo en el área de estudio.....	72
Figura 10. Distribución porcentual del riesgo en Aratoca.....	72
Figura 11. Distribución porcentual del riesgo en Charta.....	73

Lista de Mapas

Mapa 1. Delimitación zona de estudio	46
Mapa 2. Fallas geológicas presentes en la zona de estudio.	47
Mapa 3. Geomorfología presente en la zona de estudio	47
Mapa 4. Litología zona de estudio.....	48
Mapa 5. Mapa de pendientes en la zona de estudio.....	49
Mapa 6. Mapa de uso y cobertura del suelo en la zona de estudio.....	50
Mapa 7. Distribución espacial de estaciones IDEAM en la zona de estudio.	52
Mapa 8. Distribución espacial de centros de pixel cada 5 km para la zona de estudio	53
Mapa 9. Precipitación media anual zona de estudio.....	53
Mapa 10. Deslizamientos ocurridos en la zona de estudio, año 2010.	56
Mapa 11. Red vial de la zona de estudio.	57
Mapa 12. Ráster de pendientes reclasificado.	66
Mapa 13. Ráster de uso y cobertura de suelo reclasificado.....	67
Mapa 14. Ráster de permeabilidad reclasificado.....	68
Mapa 15. Amenaza con EMAP 1 y EMAP 2.	69
Mapa 16. Zonificación de amenaza Matanza y Charta.	70
Mapa 17. Mapa de vulnerabilidad según la presencia/ausencia de vías.....	71
Mapa 18. Zonificación de riesgo en Aratoca con EMAP 1 y EMAP 2.....	73
Mapa 19. Zonificación de riesgo en Charta con EMAP 1 y EMAP 2.....	74

Lista de Apéndices

Apéndice A. Puntajes asignados en la priorización de la inversión en vías terciarias	90
Apéndice B. Ejemplos de nomenclatura de unidades geológicas de superficie	91
Apéndice C. Ejemplos de unidades geomorfológicas.	92
Apéndice D. Clasificación Corine Land Cover para Colombia.	95
Apéndice E. Principales fuentes satelitales de datos sobre precipitación.....	97
Apéndice F. Descriptores de precipitación (EMAP, EMAX e IMAX).....	98
Apéndice G. Amenazas calculadas con los distintos descriptores de precipitación.....	101

Resumen

Título: Incorporación del factor de riesgo climatológico como componente dentro de los criterios de inversión para infraestructura vial terciaria. *

Autor: Angélica Johana Mora Pedroza, Oscar Fernando Velandia Ardila **

Palabras clave: inversión vial, precipitación, riesgo, CHIRPS, SIG, deslizamientos, Mora-Varhson

Descripción:

La infraestructura vial terciaria que está a cargo de los municipios es clave para el intercambio de productos y servicios entre zonas rurales y urbanas del país. Las regiones más vulnerables a riesgos naturales se ven en condiciones de desigualdad pues actualmente se tiene en cuenta factores espaciales, económicos y sociales, pero no se tiene en cuenta el factor climatológico como criterio de priorización en la inversión en vías terciarias. Esta necesidad se amplifica en el contexto del cambio climático pues este trae consigo modificaciones considerables de temperatura y precipitación, potenciando los fenómenos atmosféricos. Este estudio propone una estrategia espacial cualitativa para la evaluación del riesgo climatológico en vías terciarias (ocurrencia de deslizamientos) basada en la Metodología de evaluación de amenaza de Mora-Vahrson. El análisis tuvo en cuenta pendiente, permeabilidad y uso y cobertura de suelo como factores condicionantes y la precipitación acumulada normalizada como factor detonante. Los resultados espaciales de amenaza y riesgo en la zona coinciden espacialmente con la ocurrencia de deslizamientos reportados por el inventario SIMMA. Aunque la metodología propuesta se aplicó en una zona al nororiente de Santander, esta puede ser implementada en otras áreas para planificar acciones de inversión futuras en el marco de escenarios de precipitación por cambio climático.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Sandra Rocío Villamizar Amaya

Abstract

Title: Incorporation of the climatological risk factor as a component within the investment criteria for tertiary road infrastructure. *

Author: Angélica Johana Mora Pedroza, Oscar Fernando Velandia Ardila **

Keywords: road investment, precipitation, risk, CHIRPS, GIS, landslides, Mora-Varhson.

Description:

The tertiary road infrastructure that is in charge of the municipalities is key for the exchange of products and services between rural and urban areas of the country. The regions most vulnerable to natural hazards are in unequal conditions, as spatial, economic and social factors are currently taken into account, but the weather factor is not taken into account as a criterion for prioritizing investment in tertiary roads. This need is amplified in the context of climate change as it brings with it considerable changes in temperature and precipitation, enhancing atmospheric phenomena. This study proposes a qualitative spatial strategy for the evaluation of climatological risk in tertiary roads (landslide occurrence) based on the Mora-Vahrson Threat Assessment Methodology. The analysis took into account slope, permeability and land use and cover as conditioning factors, and normalized accumulated precipitation as a triggering factor. The spatial results of threat and risk in the area coincide spatially with the occurrence of landslides reported by the SIMMA inventory. Although the proposed methodology was applied in an area to the northeast of Santander, it can be implemented in other areas to plan future investment actions within the framework of precipitation scenarios due to climate change.

*Bachelor thesis

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingeniería civil. Director: Sandra Rocío Villamizar Amaya

Introducción

La infraestructura vial colombiana es clave para la economía y desarrollo del país por lo que es de vital importancia conocer y comprender las implicaciones de su estado actual. Las vías terciarias permiten el intercambio de productos y servicios entre zonas rurales y urbanas; esto es clave para el crecimiento económico de las regiones y del país (Guzmán, 2016; Jarboui, 2013). Su mal estado genera retrasos en tiempos de desplazamiento, pérdida de la calidad de los productos, y aumento en costos de operación, lo que conlleva al alza en los costos de los productos y la baja competitividad para el país (Pérez-Valbuena, 2005). Min transporte reporta que, a 2019, la red vial terciaria representa el 69% del total de la malla vial del país, es decir, de los 205.379 kilómetros viales colombianos, 142.284 kilómetros pertenecen a la categoría de vías terciarias (Ministerio de Transporte, 2020). Aunque no existe un inventario detallado actualizado de la red vial terciaria, aproximadamente 94% de estas vías se encuentran en mal estado (Henríquez, 2019) debido, en gran parte, a los bajos presupuestos destinados por el Gobierno Nacional a la inversión en el sistema vial terciario, recargando esta responsabilidad a los municipios (INVÍAS está a cargo únicamente del 19% de la red vial terciaria del país) (Ministerio de Transporte, 2020). Cabe destacar que la inversión en la red terciaria del país ha aumentado, pero no se ha llevado a cabo en concordancia con las necesidades regionales en términos de cantidad de kilómetros de red terciaria o porcentaje de población rural por departamento, generando condiciones de desigualdad que desfavorecen la economía de algunas regiones más vulnerables (Departamento Nacional de Planeación, Republica de Colombia, 2016)

La lista de criterios para la priorización de la inversión en las vías terciarias en un municipio o región (Documento CONPES 3857) incluye elementos espaciales, económicos y sociales para la intervención de tramos a recuperar y rehabilitar; a estos criterios le son asignados

puntos que permiten calcular un puntaje final con el cual se toma la decisión de la intervención (Apéndice A). Sin embargo, no se incluye el factor climatológico que, en principio, puede aumentar el riesgo de daño de la infraestructura vial por deslizamientos y la afectación a la estructura socioeconómica de la región. La inclusión de un componente de susceptibilidad a daños en la infraestructura vial terciaria por precipitación, en conjunción con los aspectos espaciales, económicos y sociales, permitirían establecer una caracterización del riesgo mucho más coherente con las necesidades de las regiones. Esta necesidad se amplifica en el contexto del cambio climático pues este trae consigo modificaciones considerables de temperatura y precipitación, potenciando los fenómenos atmosféricos y aumentando la frecuencia de eventos hidrometeorológicos extremos (Meyer & Pachauri, 2014). Adicionalmente, la variabilidad climática puede producir largos períodos de extrema sequía o de extrema humedad, que afectan las dinámicas biofísicas y socio económicas de las regiones (Stern & Easterling, 1999). Todo esto afecta los parámetros de diseño, las actividades de construcción, operación y mantenimiento de la infraestructura vial (CAF Banco de Desarrollo de América Latina, 2018; Calderón & Cuellar, 2019; ONTHEROAD, 2019).

En el presente estudio se demostró que el riesgo climatológico es un factor importante en el proceso de toma de decisiones de inversión en infraestructura vial terciaria. A través de la revisión de literatura y documentos oficiales, se identificaron los factores que juegan un papel preponderante en el cálculo de dicho riesgo, y se determinó un indicador de riesgo ajustado a las condiciones de disponibilidad y de resolución espacial de la información usada en el análisis. El piloto realizado en la zona nororiental del departamento de Santander permitió hacer una implementación de la metodología propuesta y los resultados de amenaza y riesgo son consistentes con la ocurrencia de eventos de deslizamiento por precipitación para el año analizado.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Proponer una estrategia metodológica que permita incorporar el componente de riesgo climatológico en la matriz de criterios de inversión para la red vial terciaria en zonas de la región andina de Colombia.

1.2. Objetivos Específicos

Identificar los factores determinantes de riesgo a la infraestructura vial por condiciones climatológicas asociadas a eventos extremos de precipitación.

Sugerir un indicador de riesgo climatológico para la infraestructura vial que incorpore información espacial en las resoluciones disponibles de información secundaria existente.

Implementar un piloto de la propuesta que permita comparar las zonas prioritarias de inversión por riesgo climatológico con registros históricos existentes de daños a las infraestructuras por eventos climatológicos.

2. Marco teórico

2.1. La precipitación como factor detonante de deslizamientos y su afectación en la infraestructura vial

Recientemente la comunidad científica ha incorporado el factor climatológico en el análisis de riesgo a las infraestructuras y ha encontrado que la precipitación, asociada a eventos extremos (causados por variabilidad climática o cambio climático) juega un papel fundamental en los análisis de integridad de la infraestructura vial y de los sistemas de transporte (Chinowsky et al., 2013; Love et al., 2010). El análisis de amenaza por deslizamientos en un tramo vial en Italia encontró que algunos escenarios de cambio climático producirán incrementos sustanciales en el tiempo de la probabilidad de ocurrencia de estos eventos (Uzielli et al., 2018). En el estado de Alaska (EE.UU.), la Junta de Investigación del Transporte atribuyó al cambio climático algunos problemas de la infraestructura como el pandeo debido al aumento de la temperatura, los deslizamientos provocados por los eventos de precipitación intensa, y el asentamiento y hundimiento de las carreteras por descongelación de nieve (Larsen et al., 2010). De igual manera, distintos estudios realizados en ese país para la intervención de carreteras resaltan que se debe tener en cuenta y evaluar cambios de temperatura y precipitación provenientes directamente del cambio climático para la gestión eficaz de los 8.4 millones de millas de carreteras (Chinowsky et al., 2013). Finalmente, investigaciones realizadas por la sede Suiza de la Organización Meteorológica Mundial concluyen que los impactos del cambio climático en el sector del transporte están evolucionando lentamente y, en muchos sentidos, su impacto es incierto; por consiguiente, es necesario crear un enfoque que incluya la planificación y diseño de las estructuras teniendo en cuenta la incertidumbre climática, destacando la necesidad de una investigación y un desarrollo continuos orientados al cambio y la variabilidad climática (Love et al., 2010).

Una de las consecuencias directas producidas por la precipitación es la reducción de parámetros de resistencia superficial de un talud causada por la infiltración de la lluvia (Froude & Petley, 2018; Pisano et al., 2017). Durante un evento de precipitación, una fracción de esta puede infiltrarse en el talud provocando, en algunos casos, que este se sature completamente lo que equivale a una disminución considerable de las fuerzas internas que unen las partículas de suelos (cohesión). Este es un factor detonante de deslizamientos someros en suelos de textura fina y baja permeabilidad (Gómez, 2008; Guzzetti et al., 2008; Lim et al., 1996; Ng & Shi, 1998; Suárez, 1998; S. Zhang, 2010). También se presenta una disminución abrupta de la presión de poros negativa y un aumento del nivel freático que afecta específicamente la resistencia al corte, conllevando a que ocurran deslizamientos profundos dado que se incrementa el peso unitario de la masa de suelo (Camposano, 2016; Crozier, 2010; Ray & Jacobs, 2007; Salazar, 2011).

Se han determinado múltiples parámetros de la precipitación que están relacionados con deslizamientos de tierra. (Ramos et al., 2015) presenta un resumen de los estudios más relevantes a nivel mundial relacionados con los umbrales de lluvia que generan deslizamientos. Este trabajo caracteriza 32 tipos de variables derivadas de precipitación en forma de parámetros independientes, dependientes o combinados. Aunque el estudio concluye que es necesario generar parámetros y umbrales para cada zona geográfica y clima específico, identifica cuatro parámetros predominantes en la literatura: la relación intensidad-duración (ID), lluvia acumulada (E), intensidad de lluvia normalizada (I_{MAPD}) y lluvia diaria para el día del evento (R).

2.1.1. Intensidad-duración (ID)

Es uno de los parámetros más usados para establecer el umbral entre los eventos de precipitación que terminaron y no terminaron en deslizamientos de tierra, convirtiéndose en uno de los principales factores de estudio en los sistemas de alerta temprana locales y regionales

(Akcali et al., 2010; Bogaard & Greco, 2018; Y. Zhang, 2020). Se han establecido múltiples umbrales empíricos de ID (Tabla 1), que obedecen a la forma de la Ecuación 1

Ecuación 1

$$I=C+(\alpha * D^{\beta}),$$

donde la intensidad media de lluvia (I , mm/h) que representa el umbral para ocurrencia de deslizamientos se calcula en función de la duración de la lluvia (D , hr) y de parámetros específicos de la zona (C , α y β). Aunque es interesante que se haya reconocido un modelo general, las ecuaciones particulares no son comparables entre sí, lo que no permite elegir entre ellas (Guzzetti et al., 2007).

Tabla 1

Ecuaciones para el cálculo de umbrales de intensidad-duración relacionados con la ocurrencia de deslizamientos.

Escala	Área de Aplicación	Ecuación	Rango D
Global	Mundo	$I=14.82 \times D^{-0.39}$	$0.167 < D < 500$
Global	Mundo	$I=30.53 \times D^{-0.57}$	$0.5 < D < 12$
Global	Mundo	$I=0.48 + 7.2 \times D^{-1}$	$0.1 < D < 100$
Global	Mundo	$I=7 \times D^{-0.60}$	$0.1 < D < 3$
Local	Lombardía, norte Italia	$I=44.67 \times D^{-0.78}$	$1 < D < 1000$
Local	Ridge, Oregón	$I=9.9 \times D^{-0.52}$	$1 < D < 170$
Local	Moscardo Torrent, NE Italia	$I=15 \times D^{-0.70}$	$1 < D < 30$
Local	Seattle, Washington	$I=82.73 \times D^{-1.13}$	$20 < D < 55$
Local	Alpes Apuanos Italia	$I=26.871 \times D^{-0.638}$	$0.1 < D < 35$
Regional	Carinthia, Sur Austria	$I=41.66 \times D^{-0.77}$	$1 < D < 1000$
Regional	Suiza	$I=32 \times D^{-0.70}$	$1 < D < 45$
Regional	Campania, sur Italia	$I=28.10 \times D^{-0.74}$	$1 < D < 600$
Regional	Jamaica	$I=11.5 \times D^{-0.26}$	$1 < D < 150$
Regional	Vancouver, Canadá	$I=4 \times D^{-0.45}$	$0.11 < D < 151$
Regional	Piamonte, Italia	$I=19 \times D^{-0.50}$	$4 < D < 150$

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Guzzetti et al., 2007)

La escala de los umbrales ID es una de sus principales limitaciones dado que la evidencia muestra que los umbrales globales no tienen en cuenta factores geo ambientales como la litología, la profundidad del suelo, el uso de la tierra, o el tipo de flora, lo que disminuye su precisión predictiva ante deslizamientos en comparación con los umbrales regionales y locales. Además, los umbrales globales tienden a presentar una resolución de datos media-baja provocando, en ocasiones, una predicción de deslizamientos que no ocurren (falsos positivos). También se presentan incidentes con los umbrales locales y regionales dado que su aplicación es para una zona específica por lo cual no es posible usarlos en otras áreas distintas a su origen (Akcali et al., 2010; Caine, 1980; Godt et al., 2006; Guzzetti et al., 2007; Huang & Xiang, 2018; Ponziani et al., 2012).

2.1.2. Precipitación acumulada (E)

La acumulación de lluvias moderadas procedentes de varios días puede provocar un incremento del nivel freático producto de la recolección de agua en el suelo que puede ser causante de deslizamientos profundos. El nivel freático no cambia de manera instantánea ante un evento de lluvia sino que su aumento se produce aproximadamente al decimoquinto día después de la primera lluvia (Echeverri & Valencia, 2004; M. L. Lee et al., 2014). Después de una temporada alta de lluvias se produce una saturación en los suelos que conlleva a que una precipitación eventual de poca intensidad pueda detonar en un deslizamiento profundo, pues se excede el límite (umbral) permitido en la estabilidad del talud (L. M. Lee et al., 2009; Low, 2012).

Los umbrales empíricos no tienen en cuenta criterios matemáticos ya que están determinados mediante la esquematización de la ocurrencia de deslizamientos para distintos periodos de lluvia acumulada (3,5,10,15 y 30 días). Se ha evidenciado que la precipitación acumulada antecedente de 3 días (P3) y la precipitación acumulada precedente de 15 días (P15) brindan los resultados más precisos (Tabla 2) (Ceccarini et al., 1981; Echeverri & Valencia, 2004;

Moreno et al., 2006; Paz & Torres, 1989; Pradenas, 2014). Por otra parte, algunos autores consideran que la relación entre la lluvia acumulada (E) y la precipitación media anual (PMA o MAP por sus siglas en inglés) es un excelente índice de susceptibilidad ante deslizamientos, pues se ha evidenciado que el peligro es alto si la lluvia acumulada alcanza un 30 % de la lluvia media anual (Mayorga, 2003).

Tabla 2

Umbral de lluvia acumulada

Escala	Área	Ecuación	Rango P_3 (mm)	Rango P_{15} (mm)
Local	Medellín, Antioquia	$P_3 = (-0.55 * P_{15}) + 60$	$0 < P_3 < 60$	$0 < P_{15} < 110$
Regional	Antioquia, Colombia	$P_3 = (-0.5 * P_{15}) + 75$	$0 < P_3 < 75$	$0 < P_{15} < 150$
Local	Seattle, Washington	$P_3 = (-0.67 * P_{15}) + 89$	$0 < P_3 < 89$	$0 < P_{15} < 127$
Local	Autopista Itata, Chile	$P_3 = (-0.2 * P_{15}) + 20$	$P_3 > 20$	$P_{15} > 100$

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Pradenas, 2014)

Una gran ventaja de la precipitación acumulada es la simplicidad en el análisis ya que se puede determinar con datos de nivel diario, muy comunes en las plataformas y estaciones pluviométricas. Sin embargo, presenta una limitación referente a la determinación de los umbrales, pues estos se definen de manera visual, lo que puede conllevar a fallas producto del error humano (Ramos et al., 2015).

2.1.3. Intensidad de lluvia normalizada- Duración (I_{MAPD})

Cuando se trabaja con datos de precipitación que presentan una diferencia grande de valores entre sí, se pueden producir errores de precisión en los umbrales de intensidad-duración ante lo cual algunos autores decidieron realizar sus análisis con intensidad normalizada, definida como la relación entre la intensidad de lluvia (I) y la precipitación media anual (MAP) (Ecuación 2) que, en conjunto con la duración (D), son los principales parámetros de estudio en deslizamientos de tierra poco profundos, caracterizados por permitir la comparación entre las

ecuaciones para umbrales propuestos en distintas regiones (Tabla 3) (Guidicini & Iwasa, 1977; Guzzetti et al., 2007; Zhou & Tang, 2014).

Ecuación 2

$$I_{MAP} = \frac{I}{MAP} [h^{-1}]$$

Los umbrales que desencadenan deslizamientos establecidos con la relación I_{MAP} -D (Tabla 3), revelan que eventos con una intensidad de lluvia normalizada que alcancen el 28% de la precipitación media anual para una duración de 10 h pueden provocar peligro alto ante movimientos en masa. De igual forma, indican que una intensidad de lluvia normalizada que sobrepase el 7% de la precipitación media acumulada es suficiente para causar deslizamientos de tierra en eventos de lluvias de más de 100 horas de duración (Bacchini & Zannoni, 2003; Dahal et al., 2008; Saito et al., 2010). Esto sugiere que se debe realizar una evaluación exhaustiva del papel que juegan estos dos factores (I_{MAP} y D) en la ocurrencia de deslizamientos en un sitio específico de interés.

Tabla 3

Umbrales de intensidad normalizada- duración.

Escala	Área	Ecuación	Rango D (h)
Local	Valsesia, Piamonte, Italia	$I_{MAP}D=1.1122 \times D^{-0.2476}$	$1 < D < 200$
Local	Valle de Ossola, Piamonte, Italia	$I_{MAP}D=0.622 \times D^{-0.2282}$	$1 < D < 200$
Local	Valle de Lanzo	$I_{MAP}D=1.6058 \times D^{-0.464}$	$1 < D < 200$
Local	Valle de Orco, Piamonte, Italia	$I_{MAP}D=1.683 \times D^{-0.553}$	$1 < D < 200$
Local	Dolomitas, Italia	$I_{MAP}D=0.74 \times D^{-0.56}$	$0.1 < D < 100$
Regional	Himalaya, Nepal	$I_{MAP}D=1.10 \times D^{-0.59}$	$1 < D < 24$
Regional	Piamonte, Italia	$I_{MAP}D=0.76 \times D^{-0.33}$	$2 < D < 150$
Regional	Piamonte, Italia	$I_{MAP}D=4.62 \times D^{-0.79}$	$2 < D < 150$
Global	Mundo	$I_{MAP}D=0.0016 \times D^{-0.40}$	$0.1 < D < 1000$
Global	Mundo	$I_{MAP}D=0.0005 \times D^{-0.13}$	$48 < D < 1000$
Global	Mundo	$I_{MAP}D=0.25 \times D^{-0.39}$	$0.1 < D < 1000$

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Bacchini & Zannoni, 2003)

Una de las limitaciones que presenta este parámetro de precipitación está relacionado con el tiempo del evento de precipitación, dado que la mayor precisión se atribuye a eventos de lluvia de corta duración (menos de 48 horas) donde se ha comprobado a partir de curvas de probabilidad, una alta propensión de fallas someras en los taludes (Barberio et al., 2004).

2.1.4. Lluvia diaria para el día del evento (R).

Es un parámetro muy usado en los análisis de precipitación dado que es el formato principal de tiempo reportado en las bases de datos y estaciones pluviométricas. Su uso principalmente se ha dado en combinación con otros parámetros de la precipitación puesto que su aplicación de manera individual no ha presentado mucha influencia en deslizamientos de tierra, debido a que los umbrales propuestos (Tabla 4) presentan una variabilidad considerable entre sí que no ha permitido establecer un único valor (Ramos et al., 2015). Por ejemplo, un estudio realizado en los pirineos entre Francia y España evidenció que los deslizamientos presentados entre los años 1965 y 1966 sobrepasaron el umbral propuesto de 120 mm; no obstante, durante los años 1972-1974 ocurrieron numerosos deslizamientos con precipitaciones menores al umbral (80 mm) (Corominas & Moya, 1999; Crozier, 2010; Glade, 1998).

Tabla 4.

Umbrales de lluvia diaria.

Escala	Área	R (mm)
Local	Casco urbano Manizales (Colombia)	70 mm
Local	Biniarroi, Mallorca (España)	130 mm
Regional	Hawke's Bay (Nueva Zelanda)	300 mm
Regional	Wairarapa (Nueva Zelanda)	120 mm
Regional	Wellington (Nueva Zelanda)	140 mm
Regional	Mallorca (España)	120 mm
Regional	Syangja (Nepal)	230 mm

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Glade, 1998; Khanal & Watanabe, 2005; Moreno et al., 2006)

Por otra parte, algunos autores han encontrado que un talud saturado producto de acumulación de lluvias durante varios días, presenta mayor susceptibilidad a deslizamientos lo

que ha permitido establecer un umbral crítico de lluvia diaria que depende del comportamiento de la lluvia antecedente y de una combinación específica entre estos dos factores. Por ejemplo, en una investigación realizada en Mallorca (España) se evidenció la ocurrencia de deslizamientos cuando se superó un umbral de lluvia diaria de 20 mm con una combinación de lluvia antecedente de 10 días mayor a 800 mm (Corominas & Moya, 1999; Cuesta et al., 1999; Díaz de Terán et al., 1997). Desafortunadamente, la calidad de la información de lluvia diaria se puede ver afectada por errores en la estrategia de reporte de los eventos. Por ejemplo, un evento de lluvia que inicia en altas horas de la noche y termina en la mañana del día siguiente puede ser identificado como dos eventos de lluvia distintos (Gabet et al., 2004; Glade, 1998).

2.2. Factores condicionantes para la ocurrencia de deslizamientos.

Se ha demostrado que la ocurrencia de un movimiento de remoción en masa ocurre por una combinación entre un factor detonante (precipitación para nuestro caso de interés) y una serie de factores condicionantes presentes en la ladera, definidos como el conjunto de condiciones bióticas y abióticas del terreno que pueden favorecer la ocurrencia de un fenómeno de remoción en masa (Ángulo, 2011; Froude & Petley, 2018; Glade, 2003). Los factores condicionantes que más tienen incidencia en un movimiento en masa de una ladera están relacionados con (1) la capacidad de infiltración del suelo, que a su vez depende de las propiedades del tipo de suelo (textura, permeabilidad, porosidad), la pendiente del talud, la cobertura y uso del suelo, y las condiciones de humedad antecedente; (2) la litología y geomorfología de la ladera; (3) la distancia a fallas estructurales; (4) la distancia a infraestructuras (vial y de otros tipos), pues la construcción de infraestructuras se debe considerar como una interrupción al equilibrio y a las condiciones originales del talud (L. J. P. Londoño, 2017; Persichillo et al., 2017; Pisano et al., 2017).

2.2.1. Capacidad de infiltración

La investigación geotécnica ha evidenciado que la inestabilidad de una ladera está relacionada con su capacidad de infiltración demostrando que una baja capacidad de infiltración incrementa considerablemente la presión de poros haciendo que los esfuerzos efectivos disminuyan y, a su vez, conllevan a que ocurran deslizamientos profundos (Cho, 2009; Jiménez, 2017; Suárez, 1998). La velocidad del agua que ingresa en un talud (capacidad de infiltración) es un parámetro que está condicionado por las propiedades del talud. Por ejemplo, respecto al tipo de suelo, se ha demostrado que en una arena la velocidad de infiltración es mayor que en una arcilla (Aristizábal et al., 2011); otra variable que altera la capacidad de infiltración es la vegetación pues se ha evidenciado que en zonas con abundante flora algunas gotas de lluvia quedan retenidas en la hojas provocando una disminución de la tasa de infiltración (Suárez, 1998). En razón a la pendiente del talud, se ha demostrado que la infiltración es baja en terrenos con altas pendientes pues estos favorecen la escorrentía superficial (Pizarro et al., 2003); también se ha evidenciado que suelos con coeficiente de permeabilidad alto (10^{-1} cm/s) tiene mayor capacidad de infiltración (Badillo & Rodríguez, 2005). Sin embargo también se debe tener en cuenta que cuando la intensidad de lluvia es baja, la escorrentía es baja, favoreciendo el mecanismo de infiltración (Pradel & Raad, 1993). Se han propuesto clasificaciones de la susceptibilidad ante deslizamientos donde se tienen en cuenta los parámetros que condicionan la infiltración (Tabla 5)

Tabla 5

Susceptibilidad a deslizamientos por infiltración

Tipos de suelo	Grado de permeabilidad	Coeficiente de permeabilidad cm/s	Drenaje	Susceptibilidad
Grava limpia	Alto	10^{-1}	Buena	Muy baja
Arena limpia	Medio	10^{-3}	Buena	Baja

Grava arenosa	Medio	10^{-3}	Buena	Medio
Arena fina	Bajo	$10^{-5} - 10^{-3}$	Franca pobre	Moderado
Limos	Bajo	$10^{-5} - 10^{-3}$	Franca pobre	Alto
Arena limo arcillosa	Muy bajo	$10^{-7} - 10^{-6}$	Pobre	Muy alto
Arcilla homogénea	Prácticamente impermeable	$<10^{-7}$	Practicante imperceptible	Extremo

Nota: Adaptado por los autores a partir de mecánica de suelos (Badillo & Rodríguez, 2005)

Los modelos de infiltración, aplicados para determinar el grado de afectación en la estabilidad de un talud de acuerdo a la variación del nivel freático, asumen que toda el agua infiltrada llega hasta ese nivel; sin embargo, esta consideración ha sido cuestionada por algunos autores, pues consideran que estos métodos no tiene en cuenta que el agua infiltrada puede drenar de manera subterránea como también puede ser absorbida por los estratos superiores, condicionando la capacidad de infiltración a la calidad de drenaje presente en el talud (Aparicio, 1989; Cho, 2009; Kim et al., 2004).

2.2.2. *Pendiente*

La pendiente es un factor multifuncional caracterizado por ser uno de los que mayor presencia tiene en los estudios relacionados a la susceptibilidad de deslizamientos asociados a eventos de precipitación. Su principal aplicación ha sido de manera directa como factor condicionante, pero también se ha utilizado de forma indirecta y parcial como parámetro en los análisis de factores litológicos y geomorfológicos (Suárez, 2009). En distintas clasificaciones de susceptibilidad ante movimientos en masa, la pendiente ha sido estudiada como parámetro único (Tabla 6 y Tabla 7) o combinada con otras variables.

Se ha demostrado que el valor de la pendiente tiene un efecto más significativo cuando se relaciona con parámetros mecánicos como el ángulo de fricción (Tabla 8) o también, cuando se mezcla con el tipo de roca subyacente pues mientras las rocas ígneas pueden permanecer estables con inclinaciones de más de 45° , otros tipos de rocas, como las sedimentarias, presentan

inestabilidad cuando su inclinación sobrepasa los 20° (Persichillo et al., 2017; Suárez, 1998). Por ejemplo en un estudio realizado al noroeste de Medellín (Colombia) se encontró que los deslizamientos ocurridos en la zona se presentaron en taludes con pendiente menor de 25° que reposaban sobre formación inestables de rocas meteorizadas (Echeverri & Valencia, 2004).

Tabla 6

Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la clasificación de pendiente propuesta por Mora- Vahrson.

Inclinación		Susceptibilidad
(%)	(°)	
0 – 15	0 – 8.5	Muy bajo
15-30	8.5 – 16.7	Bajo
30 – 50	16.7 – 26.6	Medio
50-100	26.6- 45	Alto
>100	>45	Muy alto

Nota: Tomado de (Mora & Vahrson, 1991)

Tabla 7

Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la clasificación de pendiente propuesta por Van Zuidam

Inclinación (grados)	Susceptibilidad
0-2	Muy suave
2-4	Suave
4-8	Moderado
8-16	Moderadamente abrupto
16-35	Abrupto
35-55	Muy abrupto
>55	Extremadamente abrupto

Nota: Tomado de (Van Zuidam, 1986)

Tabla 8

Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la clasificación de pendiente propuesta por Jaime Suárez

Inclinación (grados)	Susceptibilidad
<20	Bajo
>45	Medio
>Ángulo fricción	Alto

Nota: Tomado de (Suárez, 1998)

2.2.3. Cobertura y uso del suelo

La cobertura y uso del suelo es un factor condicionante muy dinámico susceptible a cambios significativos en corto tiempo por procesos antropogénicos o naturales (Pisano et al., 2017; Van Westen, 2010). Se ha evidenciado que existe una relación cercana entre los deslizamientos de tierra y la deforestación producto de la actividad humana; las zonas con susceptibilidades más altas son los suelos cubiertos por pastos, maleza y áreas donde han ocurrido incendios forestales (Alcántara et al., 2006; Glade, 2003). Así mismo, las zonas cultivadas y boscosas contribuyen a la estabilidad de una ladera, pues las raíces funcionan como anclajes que ayudan a reforzar la estructura del suelo (Beguería, 2006; Pisano et al., 2017; Suárez, 1998). Otros estudios muestran que el abandono de tierras previamente modificadas resulta en efectos negativos para la estabilidad de una ladera debido a la ausencia del hombre; esto puede conllevar a que se produzca un aumento en el nivel freático por la desatención que se da en la zona (Persichillo et al., 2017). La evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos por uso y cobertura del suelo se puede soportar en la evaluación de los cambios ocurridos a través del tiempo mediante visitas de campo o el uso de imágenes satelitales (Pisano et al., 2017; Promper et al., 2014), (Tabla 9), o mediante la evaluación del potencial erosivo de las coberturas actuales (Tabla 10).

Tabla 9

Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la clasificación según cambios ocurridos en uso y cobertura del suelo

Uso y cobertura		Susceptibilidad
Pasada	Actual	
Cultivos	Pastizales y matorrales	Alta
Bosques	Pastizales y matorrales	Alta
Pastizales y matorrales	Cultivos	Media
Bosque	Cultivos	Media
Pastizales y matorrales	Bosque	Baja
Cultivos	Bosque	Baja

Nota: Tomado de (Pisano et al., 2017)

Tabla 10

Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la clasificación de uso y cobertura del suelo propuesta por Jaime Suárez

Uso y cobertura	Susceptibilidad
Área urbana	Alta
Terrenos áridos	Alta
Cultivos anuales	Media
Vegetación intensa	Muy Baja
Vegetación moderada	Baja
Vegetación escasa	Muy Alta

Nota: Tomado de (Suárez, 1998)

2.2.4. Litología

Una ladera está compuesta de materiales procedentes de distintos orígenes. Litológicamente hablando, estos son suelos o rocas que a su vez están constituidos por diferentes subclases (Tabla 11) (Suárez, 1998).

Tabla 11

Clasificación general de materiales litológicos.

Tipo de material	Clase	Formación	Principales	Detalles prioritarios
Roca	Ígnea intrusiva	Enfriamiento de magma	Granito, diorita, dolerita, gabro	Alta dureza, alta resistencia a cortante
	Volcánica o ígnea extrusiva	Cristalización de materiales expulsados por los volcanes	Riolita, basalto, tobas	Fácil desintegración al humedecerse
	Sedimentarias	Cementación de arcillas, gravas y arenas	Conglomerados, lutitas, arenisca, limolitas, calizas, dolomitas	Su estabilidad depende de los planos de estratificación
Suelo	Metafórica	Recristalización de rocas ígneas	Cuarcita, neiss, esquisto, filita, mármol	La foliación las hace susceptibles a meteorización
	Residual	Producto de meteorización de rocas		Susceptibles a deslizamientos en época de lluvias

Tipo de material	Clase	Formación	Principales	Detalles prioritarios
	Aluvial	Depósitos transportados por agua	Fluvial, lacustre	Tienden a ser sueltos y blandos, propensos a erosión y deslizamientos
	Coluvial	Producto de deslizamientos de rocas o suelo		Susceptibles a deslizamientos
	Glacial	Deshielo de glaciales	Cantos, arcillas	Gran variedad de tamaños
	Eólicos	Transportados por el viento	Dunas, loess	Poca vegetación, ricos en cuarzo

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Suárez, 1998)

La resistencia de un suelo, al estar relacionada directamente con su origen, convierte a la litología en un factor importante en el análisis de susceptibilidad a deslizamientos. Sin embargo, debido a la variabilidad que se presenta en la literatura, algunos autores han propuesto trabajar este parámetro de manera resumida a partir Unidades de Geología Superficial (UGS) que integran una clasificación detallada de materiales litológicos (Apéndice B) (Abril, 2011; SGC et al., 2015). La agrupación y conformación de las UGS se basa en la similitud que presentan las características físicas de los materiales; su principal uso ha sido para la creación de mapas geológicos que posteriormente se usan como insumo para la zonificación litológica en una zona. Distintos autores han creado clasificaciones de acuerdo con la susceptibilidad de los materiales litológicos en los movimientos de masas (Tabla 12, Tabla 13, Tabla 14).

Tabla 12

Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la litología según clasificación propuesta por Jaime Suárez.

Clase	Susceptibilidad	Estado
Ígneas intrusivas	Bajo	Sin fracturar ni meteorizar (doleritas, granito)
Sedimentarias	Medio	Con poco contenido de arcilla
Sedimentarias	Alto	Con alto contenido de arcilla (lutitas)
Suelos residuales	Alto	Lluvias intensas
Suelos aluviales	Alto	Con niveles freáticos colgados

Clase	Susceptibilidad	Estado
Suelos coluviales	Alto	Deslizamientos preliminares
Ígneas extrusivas (volcánicas)	Alto	Gran contenido de humedad
Metamórficas	Alto	Estado de meteorización alto

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Suárez, 1998)

Tabla 13

Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la litología según clasificación propuesta por Mora – Vahrson.

Clase	Susceptibilidad				
	Muy bajo	Bajo	Mediana	Alta	Muy alta
Rocas intrusivas	Pocas fisuras, sin relleno	Pocas fisuras, cizallales	Cantidad de fisuras moderadas	Pocas fisuras, rellenas de arcillas	Altas fisuras, rellenas de arcillas
Rocas metamórficas	Sin fisuras	Poco fisuradas	Medianamente fisuradas	Alta fisuras	Avanzado
Rocas sedimentarias	Máximo 2 % finos	Máximo 5 % finos	Máximo 12 % finos	Máximo 50% finos	Más de 50 % finos
Suelos aluviales	Espesor grueso compactación fuerte	Espesor delgado compactación fuerte	Espesor grueso compactación leve	Espesor delgado compactación leve	Espesor delgado sin compactación
Suelos coluviales	Drenaje alto	Drenaje moderado	Drenaje poco desarrollado	Drenaje pobre	No tiene drenaje

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Mora & Vahrson, 1991)

Tabla 14

Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la litología según clasificación propuesta por el Servicio Geológico Colombiano.

Origen	Nombre deposito	Susceptibilidad
Aluvial	Depósitos de cauce y llanuras aluviales	No se involucran en problemas de estabilidad de taludes y laderas
	Depósitos de terrazas aluviales	Terrazas sobre-elevadas se involucran en masa
	Depósitos de abanicos aluviales	Presentes en el fondo de ríos, susceptibles a inestabilidad general y socavación lateral
Gravitacional	Depósitos coluviales	Se les considera los tipos de depósitos más inestables en taludes y laderas

Origen	Nombre deposito	Susceptibilidad
Lacustre	Depósitos paludales	No se involucran en problemas de estabilidad de taludes y laderas
Glacial	Depósitos glaciales y glacio-fluviales	Movimientos en masa en las partes altas de cordilleras
Volcánico	Depósitos de cenizas	Muy inestables en cultivos de café
	Flujo vulcano clásticos	Productos de explosiones volcánicas
Eólico	Depósitos eólicos	Susceptibles a erosión

Nota: Adaptado por los autores a partir de (SGC, 2016)

2.2.5. Geomorfología

Este factor condicionante es el encargado de estudiar el origen e interpretar la forma (morfogénesis), analizar los aspectos cuantitativos (morfometría) y estudiar los procesos ambientales ocurridos (morfodinámica) en un suelo (SGC, 2016, 2017). Para un mejor entendimiento de la geomorfología, se han establecido Unidades Geomorfológicas (UG) que están agrupadas de acuerdo con la similitud en las variables de morfometría, morfogénesis o morfodinámica. Las principales UG se clasificaban de acuerdo con su origen en denudacional, fluvial, estructural y glacial (Tabla 15 y Apéndice C) (Acevedo & Buitrago, 2014; SGC, 2017).

Las geoformas de origen denudacional se dan generalmente en zonas tropicales compuestas por materiales que han sufrido meteorización y suelos donde han ocurrido deslizamientos (Acevedo & Buitrago, 2014; SGC, 2016); las unidades geográficas de ambiente fluvial se originan por el transporte de suelos producto de la acumulación de sedimentos y principalmente se encuentran cerca de ríos y quebradas (Leiva, 2012); los depósitos estructurales son zonas donde el suelo se ha formado producto de actividades telúricas ocasionadas por las fuerzas internas de la tierra que producen cizallamiento de rocas y suelos (Acevedo & Buitrago, 2014); finalmente, las geoformas de origen glacial son producto de la erosión que se da como causa de procesos de deshielo, principalmente en zonas de alta montaña (Leiva, 2012; PMA:GCA, 2007).

Tabla 15*Ejemplos de unidades geomorfológicas según origen*

Origen geomorfológico	Unidad geomorfológica	Acrónimo
Denudacional	Cono flujos de detritos	Dfe
	Cerro remanente o relicto	Dcrem
	Escarpe de erosión mayor	Deem
	Escarpe de erosión menor	Deeme
	Escarpe de abanico fluvial	Fea
Fluvial	Abanico aluvial	Faa
	Abanico aluvial antiguo	Faaa
	Abanico aluvial subcreciente	Faas
	Cerro estructural	Sce
Estructural	Escarpe de línea de falla	Slfe
	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	Sshlc
	Meseta estructural	Sm
	Ladera contrapendiente de sierra homoclinal glaciada	Gshlc
Glaciar	Ladera contrapendiente de sierra anticlinal glaciada	Gsalc
	Ladera contrapendiente de sierra sinclinal glaciada	Gsslc
	Ladera contrapendiente de cuesta estructural glaciada	Gclc

Nota: Adaptado por los autores a partir de (SGC, 2017)

En distintas regiones de Colombia se crearon clasificaciones que relacionan la geomorfología y la susceptibilidad de movimientos de masas (Tabla 16).

Tabla 16*Susceptibilidad de unidades geomorfológicas ante deslizamientos.*

Susceptibilidad alta		Susceptibilidad media		Susceptibilidad baja	
Lomos residuales	Dlres	Laderas onduladas	Dlo	Superficies de erosión y aplanamiento	Dsa
Sierras denudadas	Dsd	Sierras residuales	Drs	Planicies colinadas residuales	Dpcr
Escarpe de erosión mayor	Deem	Planicies colinadas	Dpcd	Montículos y ondulaciones denudacional	Dmo
Escarpe de meseta	Sme	Colinas remanentes	Dcre	Planos anegadizos	Fpa
Conos y lóbulos coluviales	Dco	Cerros remanentes	Dcrem	Planos aluviales confinados	Fpac
Ladera de sierra sinclinal	Sssle	Planos aluviales confinados	Svc	Planos de inundación	Fpi

Susceptibilidad alta		Susceptibilidad media		Susceptibilidad baja	
Lomos	Si	Sierras de barras estructurales	Ssbe	Terrazas aluviales	Fta
Facetas triangulares	Sft	Sierras homoclinales	Ssbh	Flancos de valle glacial	Gflv
Sierras y lomos de presión	Sslp	Ladera estructural de sierra homoclinal	Sshle	Terrazas de acumulación	Fta
Loma denudada	Dld	Espolón faceteado	Sefc	Espolón	Ses

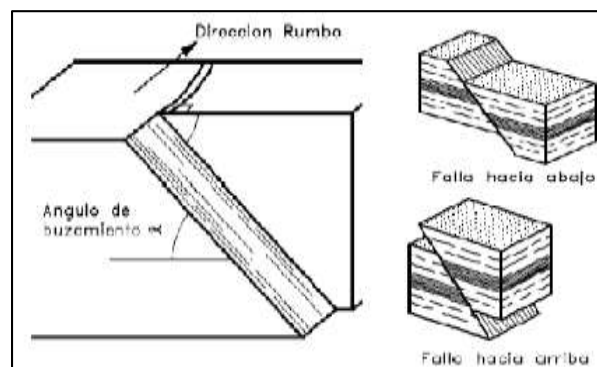
Nota: Adaptado por los autores a partir de las memorias de zonificación regionales de Colombia (<http://simma.sgc.gov.co/#/public/results/>)

2.2.6. Distancia a fallas o discontinuidades estructurales.

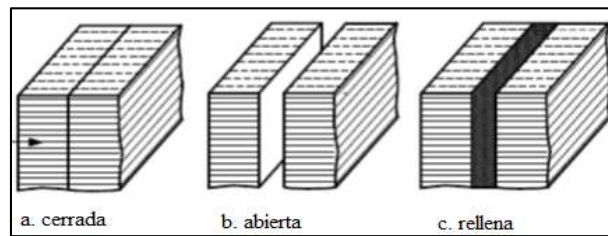
En los taludes se presentan distintas perturbaciones que se relacionan directamente con su estabilidad permitiendo deducir las posibles fisuras que pueden ocurrir por encima o debajo del ángulo de inclinación que se forma entre la horizontal y discontinuidad (buzamiento) (Figura 1) (Chigira & Yagi, 2006; Suárez, 1998). Las laderas pueden presentar fisuras o discontinuidades como respuesta a la deformación que se presenta por procesos como la conformación del talud, compactación del suelo, movimientos tectónicos, etc. (Rezaei et al., 2018). Se pueden presentar tres tipos de discontinuidades: cerrada, abierta y rellena (Figura 2) que pueden representar un peligro a la estabilidad del talud dependiendo de la separación entre ellas (Tabla 17).

Figura 1

Rumbo, buzamiento y orientación de fallas.



Nota: Tomado de (Suárez, 1998)

Figura 2*Tipos de discontinuidades*

Nota: Tomado de (Suárez, 1998)

Tabla 17*Susceptibilidad a deslizamientos según espaciamiento entre fallas*

Separación	Espaciamiento	Susceptibilidad
Extremadamente ancho	>6m.	Enormemente alta
Muy ancho	2m – 6m	Muy alta
Ancho	60 cm – 2m	Alta
Medio	20 cm – 60 cm	Medio
Cercano	6 cm – 20 cm	Baja
Muy cercano	2 cm – 6 cm	Muy baja
Extremadamente cerca	< 2 cm	Enormemente baja

Nota: tomado de (Suárez, 1998), adaptado de (Geotechnical Control, Hong Kong, 1988)

2.3. Análisis de riesgo

Los desastres naturales ocurridos por fenómenos de variabilidad climática y cambio climático han obligado a muchos países a incorporar el análisis de riesgos de desastres naturales como un fundamento en la inversión pública. En el caso de Colombia, el artículo 38 de la ley 1523 de 2012 exige que para cualquier proyecto a nivel nacional, departamental, municipal, distrital o municipal se debe realizar dicho análisis. Para el caso de movimientos de remoción en masa, en Colombia se han propuesto diversas metodologías para realizar análisis de riesgo que son aplicables dependiendo de la escala de trabajo (nacional, regional y local) y el tipo de zona (rural o urbano) (Sierra & Durán, 2019). Estas guías propuestas por el gobierno nacional, a través del Servicio Geológico Colombiano (SGC), están basadas en literatura científica nacional e internacional y experiencia propia, y se encaminan a que los entes departamentales y municipales

incorporen la gestión de riesgo en sus respectivos planes de ordenamiento territorial y los usen como herramientas para la zonificación del riesgo por movimientos de masas, enfatizando que algunas recomendaciones específicas que allí se presentan no son reproducibles en su totalidad debido a la particularidad geoambiental de cada zona de estudio. Sin embargo, si establece en términos generales que para determinar el riesgo (R) es necesario realizar un análisis de amenaza (A) y vulnerabilidad (V) (SGC, 2016, 2017; SGC et al., 2015).

Ecuación 3

$$R = A \times V$$

2.3.1. Análisis de amenaza

A nivel general existen metodologías cualitativas (Heurística y Mora -Vahrson) y cuantitativas (estadísticas y determinísticas) que permiten conocer el grado de amenaza en una zona de estudio (Ramírez & Aristizábal, 2017). Sin embargo, escoger con cuál trabajar depende de la escala, calidad, resolución y veracidad de la información a la que se tiene acceso (SGC, 2016).

2.3.1.1. Métodos cualitativos

2.3.1.1.1 Metodología heurística. Es un método recomendado para usar en escalas pequeñas, formulado por (Bransford & Stein, 1984), y que se basa en lo empírico es decir en la experiencia previa. En el ámbito de la susceptibilidad de movimientos en masa se ha implementado para identificar movimientos en masa potenciales (Jiménez, 2017). Por ejemplo, en el municipio de Fredonia (Antioquia) se elaboró un inventario de movimientos en masa con el fin identificar las zonas de posibles movimientos latentes utilizando como base la metodología heurística. En esta investigación se contó con la ayuda de un experto en el trabajo de campo y en la revisión de imágenes satelitales, que permitieron analizar los factores geotécnicos y ambientales

presentes. (Ramírez & Aristizábal, 2017). Las debilidades más importantes de este método es que no tiene un soporte matemático y es susceptible a errores humanos pues depende de la experiencia de los investigadores.

2.3.1.1.2 Metodología Mora-Vahrson. Este método, que se implementó por primera vez en las fallas presentadas en taludes en Centroamérica, está basado en relacionar factores condicionantes (relieve relativo, condiciones litológicas y humedad del suelo) con factores detonantes (intensidad de lluvia y sismos) a partir de la observación directa en el trabajo de campo (Abril, 2011; Mora & Vahrson, 1991) y posteriormente clasificar dichos factores (condicionantes y detonantes) de acuerdo con la literatura (bajo, medio y alto) para asignar un valor numérico que determine un índice por cada factor. Para obtener un grado de amenaza (H) se tiene en cuenta el índice de relieve relativo (Sr), índice de litología (Sl), índice de humedad del suelo (Sh), índice de sismicidad (Ts) y el índice de intensidad de precipitación (Tp), (Ecuación 4) (Suárez, 1998).

Ecuación 4

$$H = Sr * Sl * Sh * (Ts + Tp)$$

2.3.1.2. Métodos cuantitativos

2.3.1.2.1 Metodología estadística. Los métodos estadísticos pueden ser de carácter bivariado cuando se relacionan varios factores condicionantes con un solo factor detonante; o multivariado cuando existe una relación entre variables dependientes con múltiples variables independientes (Ramírez & Aristizábal, 2017).

2.3.1.2.1.1. Funciones estadísticas. Es un método bivariado recomendado para usar cuando se tiene gran cantidad de datos en zonas extensas y se basa en relacionar factores que hacen vulnerables un talud (condicionante) con factores ambientales (detonante) (Jiménez, 2017; Ramírez & Aristizábal, 2017). Esta metodología ha sido aplicada en la búsqueda de umbrales de

lluvia a través de funciones estadísticas de las cuales la más utilizada ha sido la distribución de probabilidad de Gumbel, ya que es la que mejor se ajusta a valores extremos en una serie de datos, como lo son las precipitaciones de intensidad alta en las series de lluvias (Aristizábal et al., 2010; Castellanos, 1996; Moreno et al., 2006).

El método de funciones estadísticas ha sido aplicado en distintos documentos, por ejemplo, en el departamento de Antioquia se realizó un estudio en el que se buscaba encontrar un umbral de lluvia antecedente de 3 y 15 días que tuviera relación con los movimientos en masa estudiados. dicho análisis se hizo a partir de la distribución de probabilidad de Gumbel, con la cual que se determinó que existía una correlación entre los mapas de deslizamientos y los mapa de lluvias, permitiendo delimitar las zonas donde ambos mapas presentaban coincidencias.(Moreno et al., 2006).

2.3.1.2.1.2. Modelación de pesos de evidencia (Weight of Evidence, WofE). Es un método estadístico bivariado que se basa en la teoría bayesiana donde se busca las posibles maneras de asociar los factores condicionantes y los factores detonantes de acuerdo con el nivel de presencia de estos. Esta metodología utiliza como su principal insumo el inventario de deslizamientos y se basa en asignar un valor (peso) a cada factor condicionante de acuerdo con la importancia de estos en un deslizamiento (Figura 3). El peso es positivo (W_i^+) si el factor condicionante está presente en el deslizamiento, en caso contrario, que en el deslizamiento no esté presente el factor condicionante, el peso será negativo (W_i^-) (Dahal et al., 2008; SGC, 2017). Para el cálculo de los pesos, Van Westen propuso las Ecuación 5 y Ecuación 6 en términos de pixeles.

Ecuación 5

$$W_i^+ = \ln \frac{\frac{N_{pix1}}{N_{pix1}+N_{pix2}}}{\frac{N_{pix3}}{N_{pix3}+N_{pix4}}}$$

Ecuación 6

$$W_i^- = L_n \frac{\frac{N_{pix2}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}}}$$

donde:

Npix1: Número de celdas que representan la presencia al mismo tiempo del factor causante y de movimientos.

Npix2: Número de celdas que representan al mismo tiempo que no hay factor causante y la presencia de movimientos.

Npix3: Número de celdas que representan la presencia al mismo tiempo del factor causante y no hay movimientos.

Npix4: Número de celdas que representan al mismo tiempo no hay factor causante y no hay movimientos.

Por último, se suman los pesos negativos y positivos para determinar un peso final (W_f) del factor condicionante como se muestra en la (Ecuación 7).

Ecuación 7

$$W_f = W_i^+ + W_i^-$$

Figura 3

Relación deslizamientos L y factor condicionante w

		w: Factor condicionante con potencialidad de deslizamientos		
		Presente	Ausente	
L: Deslizamientos	Presente	Npix1	Npix2	Área total deslizada
	Ausente	Npix3	Npix4	Área total no deslizada
		Área total con unidad w	Área total sin unidad w	Área total del mapa

Nota: Adaptado por los autores a partir de (SGC, 2017)

Una vez se obtienen los pesos (W_f) de cada factor, se realiza una combinación aleatoria entre factores condicionantes y detonantes (hipótesis de falla) que posteriormente se suman para calcular el índice de susceptibilidad (LSI) (SGC, 2017).

Ecuación 8

$$LSI_1 = Wf_{pendiente} + Wf_{curvatura} + *** +$$

En la zona de Himalaya (Nepal) y en Chinchiná (Caldas, Colombia) se utilizó la modelación de pesos de evidencia como parte de la metodología usada en la zonificación de amenazas por movimientos en masa. Once factores condicionantes (altura de talud, cobertura, curvatura, distancia a drenajes, distancia a vías, elevación, geología, geomorfología, orientación, pendientes y uso del suelo) se relacionaron con el factor detonante de intensidad máxima de precipitación de un día en diferentes combinaciones. La combinación aspecto- curvatura- drenaje- geomorfología- pendiente- vías- intensidad máxima arrojó un área bajo la curva de 75.27 % que es considerado aceptable. (Contador, 2019; Dahal et al., 2008).

2.3.1.2.1.3. Método matricial. Este método estadístico multivariado, cuya característica principal es el uso de sistemas de información geográfica (SIG) para el análisis, ha sido implementado en estudios donde la cantidad de datos es limitada. Sin embargo, para que se pueda ejecutar es importante contar con un inventario de deslizamientos pues su labor está basada en agrupar los factores condicionantes que se pueden categorizar y, posteriormente, unirlos de acuerdo con su incidencia en los deslizamientos anteriores con el objetivo de encontrar múltiples combinaciones denominadas unidades de condiciones únicas (UCU), que ayudan a determinar la densidad de deslizamientos (D). Cuando una combinación de factores condicionantes (UCU) no está asociada a la ocurrencia de deslizamientos significa que el área de deslizamientos en la Ecuación 9 es 0 (cero) por lo cual (D) tendrá el mismo valor, implicando una baja susceptibilidad en esa área. Por otra parte, si (D) tiende a 1, significa que la susceptibilidad es alta (Clerici et al., 2006; De Graff et al., 2012; Ramírez & Aristizábal, 2017).

Ecuación 9

$$D = \frac{\text{área de deslizamientos} \cap \text{área de UCU}}{\text{área de UCU}}$$

Este método fue implementado en la segunda fase del estudio del acueducto de Fredonia (Antioquia) donde se usaron los insumos espaciales (modelo digital de elevación e inventario de movimientos en masa) y distintos factores condicionantes (geología, uso de suelo, pendiente, curvatura) que fueron categorizados de acuerdo a distintas clasificaciones en la literatura existente, con lo cual se obtuvieron 464 UCU de las cuales la combinación de formación Combia- zonas urbanizadas-escarpado-cóncava-cóncava fue la de mayor susceptibilidad (0.625) (Ramírez & Aristizábal, 2017).

2.3.1.2.2 Metodología determinística. Es una estrategia de evaluación cuantitativa usada principalmente en escalas locales que busca estudiar la estabilidad de un talud específico a través de la búsqueda de un factor de seguridad que estudia la relación de las fuerzas y/o momentos actuantes y las fuerzas y/o momentos resistentes (equilibrio límite) (Ecuación 10), dichos parámetros son determinados a partir de estudios y pruebas de campo que permiten conocer las propiedades mecánicas (cohesión y ángulo de fricción), hidrológicas (nivel freático) y la estratificación de los materiales que conforman la ladera (Abril, 2011; Jiménez, 2017).

Ecuación 10

$$FS = \frac{F_{resistente}}{F_{actuante}} = \frac{M_{resistente}}{M_{actuante}}$$

Para analizar este método de tipo iterativo, se ha utilizado el método de dovelas que permite estudiar una pequeña porción suponiendo que todo el talud se comporta de manera homogénea, por lo cual se han formulado distintas ecuaciones que se diferencian entre sí por las variables geotécnicas e hidrológicas tenidas en cuenta (Tabla 18). Las metodologías más renombradas para el cálculo de factor de seguridad son Fellenius, Janbú simplificado, Bishop,

Spencer, Morgenstern y Price y Sarma. Se ha establecido que un factor de seguridad menor a 1.5 es inestable (Poveda et al., 2019; Suárez, 1998).

Tabla 18

Ecuaciones de métodos de equilibrio limite.

Método	Equilibrio	Ecuación
Bishop	Momentos	$FS = \frac{\Sigma [C'b + (W - Ub) \tan \phi'] l m a}{\Sigma W s e n \alpha}$
Janbú	Fuerzas	$FS = \frac{f o \Sigma \left[C'b + (W - Ub) \tan \phi' \frac{1}{\cos \alpha m a} \right]}{\Sigma W t a n \alpha}$
Fellenius	Fuerzas	$FS = \frac{\Sigma [C' \Delta l + (W \cos \alpha - U \Delta l \cos \alpha) \tan \phi']}{\Sigma W s e n \alpha}$

Nota. C': cohesión; ϕ : Angulo fricción; b: Ancho dovela; W: peso de dovela; U: presión de poros de cada dovela; ma: factor específico de cada método; α : Ángulo entre la perpendicular a la línea de falla y la vertical en centro de dovela; Δl : longitud de arco en la base de dovela; fo: factor de corrección de Janbú. Adaptado por los autores a partir de (Poveda et al., 2019)

Utilizando el método de Bishop a través de un software SIG se realizó el análisis de la amenaza de un talud en la vía Chagualá-Quindío, a partir de las características geológicas y las propiedades mecánicas que se encontraron en el trabajo de campo, con lo cual se pudo establecer que aunque los métodos determinísticos tienen una baja probabilidad de error, presentan limitaciones, como (1) la veracidad en los resultados depende de la precisión de los ensayos de laboratorio lo que supone una mayor inversión económica; (2) se aplica específicamente en un talud por lo cual no se pueden comparar ni reproducir valores entre distintas laderas; (3) está basado en varias simplificaciones como lo es que el talud se comporta de manera homogénea (Jiménez, 2017; Mejía et al., 2019).

2.3.2. Análisis de vulnerabilidad

En un análisis de riesgos naturales también es importante analizar el grado de afectación y la capacidad de respuesta de las personas y estructuras (vulnerabilidad) ante los distintos peligros

que se presenta en la zona de estudio (DGRDS, 2019). El análisis de vulnerabilidad tiene en cuenta los aspectos físicos, sociales, económicos y ambientales tanto de las infraestructuras como de la población los cuales son usados como base para poder determinar su nivel de peligro ante emergencia naturales (Suárez, 1998). Se han propuesto distintas tablas que definen los principales parámetros de cada aspecto de vulnerabilidad que tienen en cuenta las infraestructuras y la población (Tabla 19, Tabla 20).

Tabla 19

Clasificación de la vulnerabilidad propuesta por DGRDS

Vulnerabilidad de infraestructura y personas			
Física	Ambiental	Económica	Social
Antigüedad de la edificación	Condiciones atmosféricas	Situación de pobreza y seguridad alimentaria	Tipo de población (niños, adultos y ancianos)
Materiales de construcción y estado de conservación	Composición y calidad del aire y agua	Principal actividad económica de la región	Presencia de entidades como defensa civil
Cumplimiento de la normatividad vigente	Presencia de agua cercana (ríos, quebradas, lagunas, etc.)	Acceso a los servicios públicos y al mercado laboral	Relación entre la población y las instituciones oficiales

Nota: Adaptado por los autores a partir de metodología de conocimiento de riesgo para diferentes escenarios amenazantes en Santander. (DGRDS, 2019).

Tabla 20

Factores de vulnerabilidad propuestos por Juan Pablo Londoño.

Factores de vulnerabilidad de infraestructuras y personas	
Demográficos	Densidad poblacional. Habitantes en 50 m
	Densidad de viviendas. Viviendas en 50 m
	Presencia de vías
Físico-espaciales	Laderas estabilizadas
	Áreas morfológicas homogéneas
	Coberturas y uso de suelos
Socioeconómico	Estrato

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Londoño, 2007)

Otros autores indican que el grado de vulnerabilidad de la infraestructura se puede calcular en términos del tipo de edificación y del servicio que presta a la comunidad (I_s), del tiempo que dure en reactivarse el servicio (I_t) y de los daños que se produzcan en la estructura (I_p) (Ecuación 11, Tabla 21). Esto sirvió para la clasificación de vulnerabilidad de edificaciones ante la susceptibilidad a deslizamientos (Tabla 22) (Suárez, 1998).

Ecuación 11

$$V = I_s * I_t * I_p$$

Tabla 21

Clasificación de los impactos sociales, temporales y de pérdidas.

Impacto	Detalle	Valor
Is: impacto social	Hospital, vías, estaciones oficiales.	1
	Colegio, edificios residenciales.	0.5-0.8
	Polideportivos, parques.	0.2-0.3
It: impacto temporal	Reactivación dura más de 3 meses	1
	Reactivación dura entre 1 -3 meses	0.8
	Reactivación dura máx. 1 semana	0.6
	Reactivación dura máx. 24 h	0.4
	Reactivación dura menos de 24 h	0.1
Ip: impacto de pérdidas	Sepultado o colapso	1
	Daños estructurales, pero sin colapso	0.5-0.7
	Daños en la apariencia	0.2-0.3

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Suárez, 1998)

Tabla 22

Susceptibilidad de vulnerabilidad de infraestructura ante deslizamientos.

Valor de vulnerabilidad (V)	Susceptibilidad
0.8-1	Alta
0.4-0.7	Media
0.1-0.3	Baja

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Suárez, 1998)

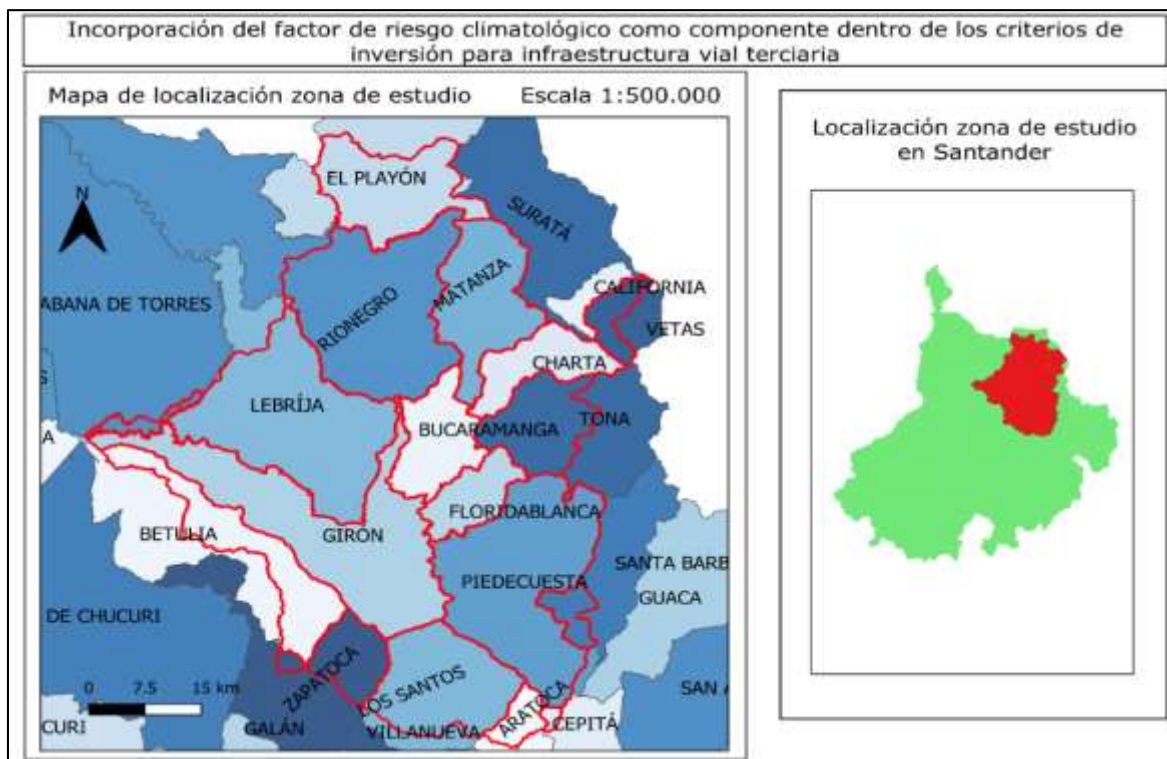
3. Contexto del área de estudio

3.1. Descripción zona de estudio

El área de estudio está ubicada al nororiente del departamento de Santander, en el cuadrante delimitado de territorio cuenta con un área aproximada de 3460 km² y se encuentra dentro de la jurisdicción de distintos municipios como Rionegro, el Playón, Suratá, Vetás, Tona, Piedecuesta, Aratoca, por las coordenadas geográficas -73.5342 Oeste con 7.5769 Norte y -72.8498 Oeste con 6.7349 Norte. Es Los Santos, Zapatoca, Betulia, Lebrija y Santa Bárbara, en pequeñas porciones, y Bucaramanga, Girón, Floridablanca, California, Charta, en su totalidad (Mapa 1). El área se encuentra afectada por las fallas geológicas de Bucaramanga, Suárez, Aratoca, Sevilla, Cristalina, Río Charta, Río Cucutilla (Mapa 2).

Mapa 1

Delimitación zona de estudio



Nota: Adaptado por los autores a partir de información provista por (UIS-AMB, 2019).

Mapa 2

Fallas geológicas presentes en la zona de estudio.

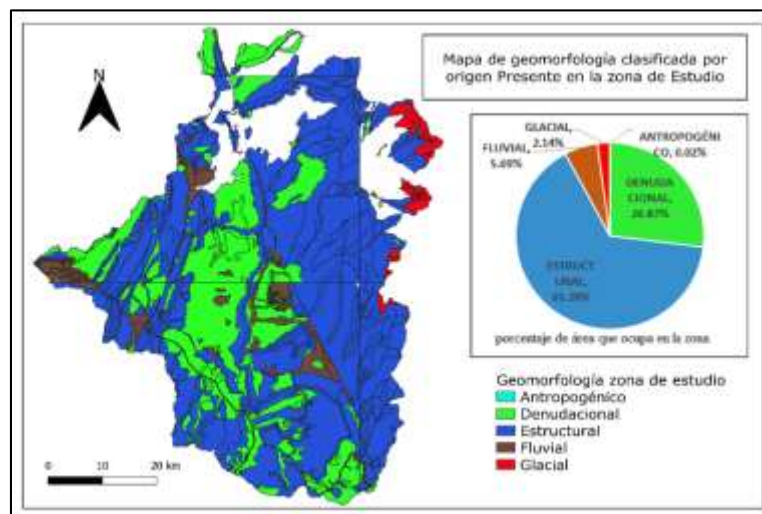


Nota: Adaptado por los autores a partir de información del Atlas Geológico de Colombia (<https://datos.sgc.gov.co/datasets>)

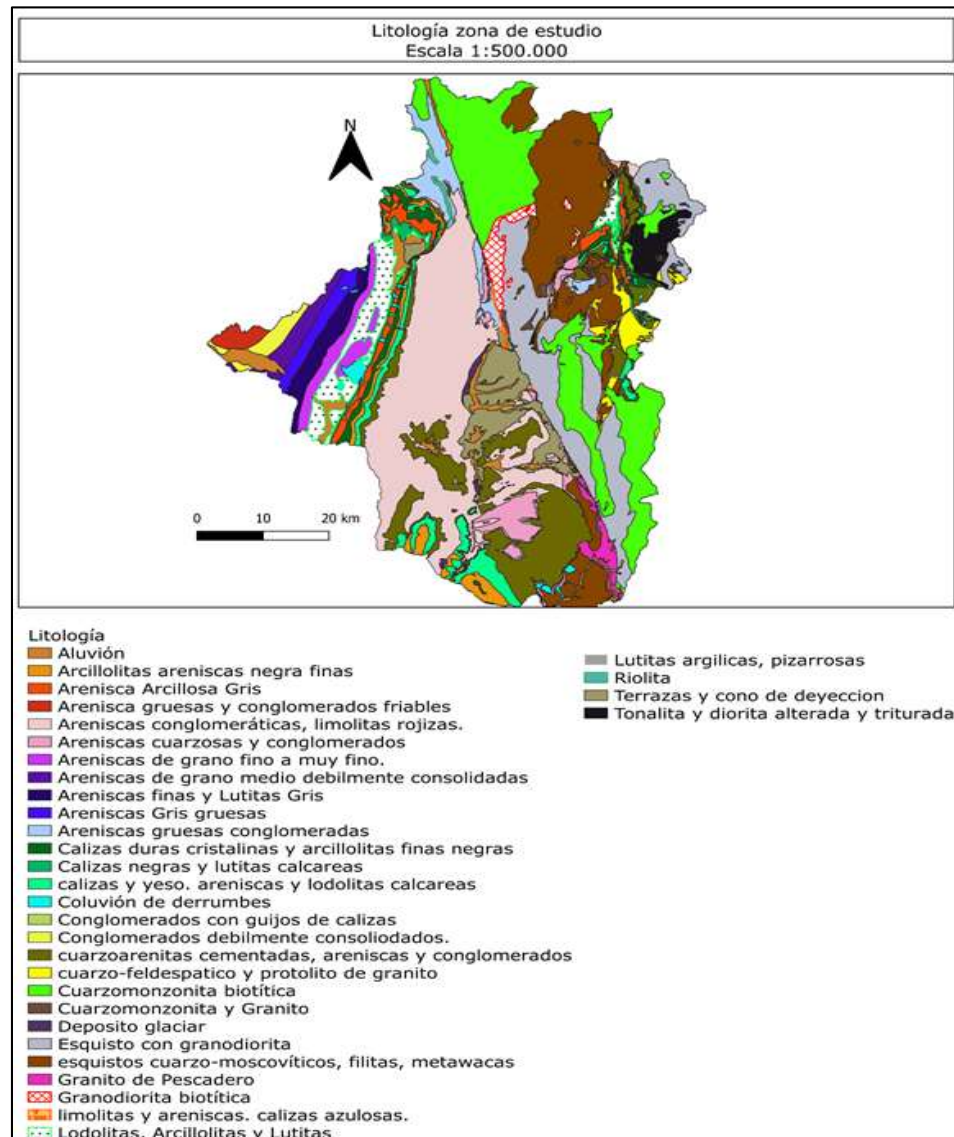
El área se caracteriza por presentar una gran variabilidad geomorfológica (Mapa 3). Desde el punto de vista de la litología, los tipos de rocas existentes son aluviones, areniscas, conglomerados, esquistos, limolitas, riolitas entre otras (Mapa 4)

Mapa 3

Geomorfología presente en la zona de estudio



Nota: Adaptado por los autores a partir de información provista por (UIS-AMB, 2019).

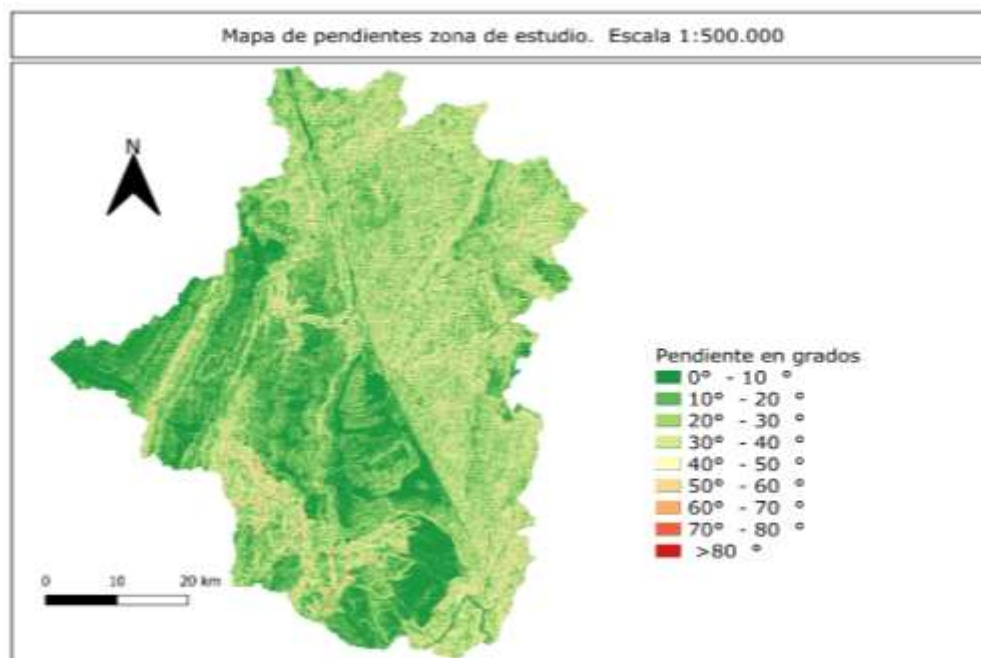
Mapa 4*Litología zona de estudio.*

Nota: Adaptado por los autores a partir de información provista por (UIS-AMB, 2019)

Las pendientes del terreno presentan un gradiente que varía desde 0° en el suroeste de la zona de estudio hasta 85° en el noreste (Mapa 5). Sin embargo, la distribución de porcentajes de área de acuerdo con rangos de pendientes sugiere que el 51% del área tiene pendientes entre 0-20°, el 47% tiene pendientes entre 20 y 50° y solo el 2% tiene pendientes mayores a los 50° (Figura 4).

Mapa 5

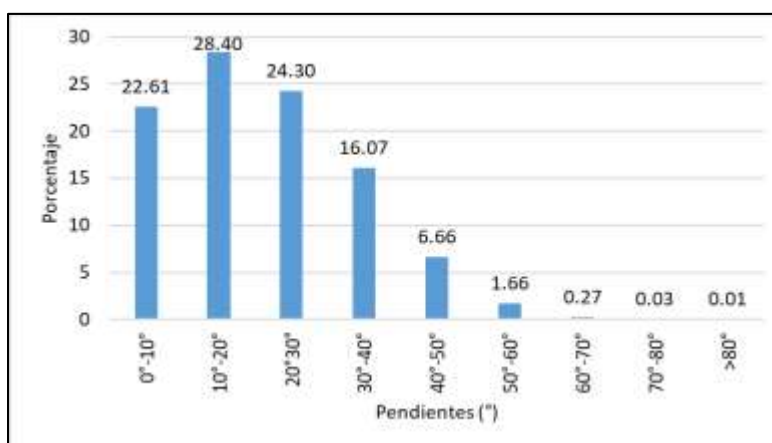
Mapa de pendientes en la zona de estudio.



Nota: Adaptado por los autores a partir de información provista por (UIS-AMB, 2019)

Figura 4

Porcentaje de área según su pendiente



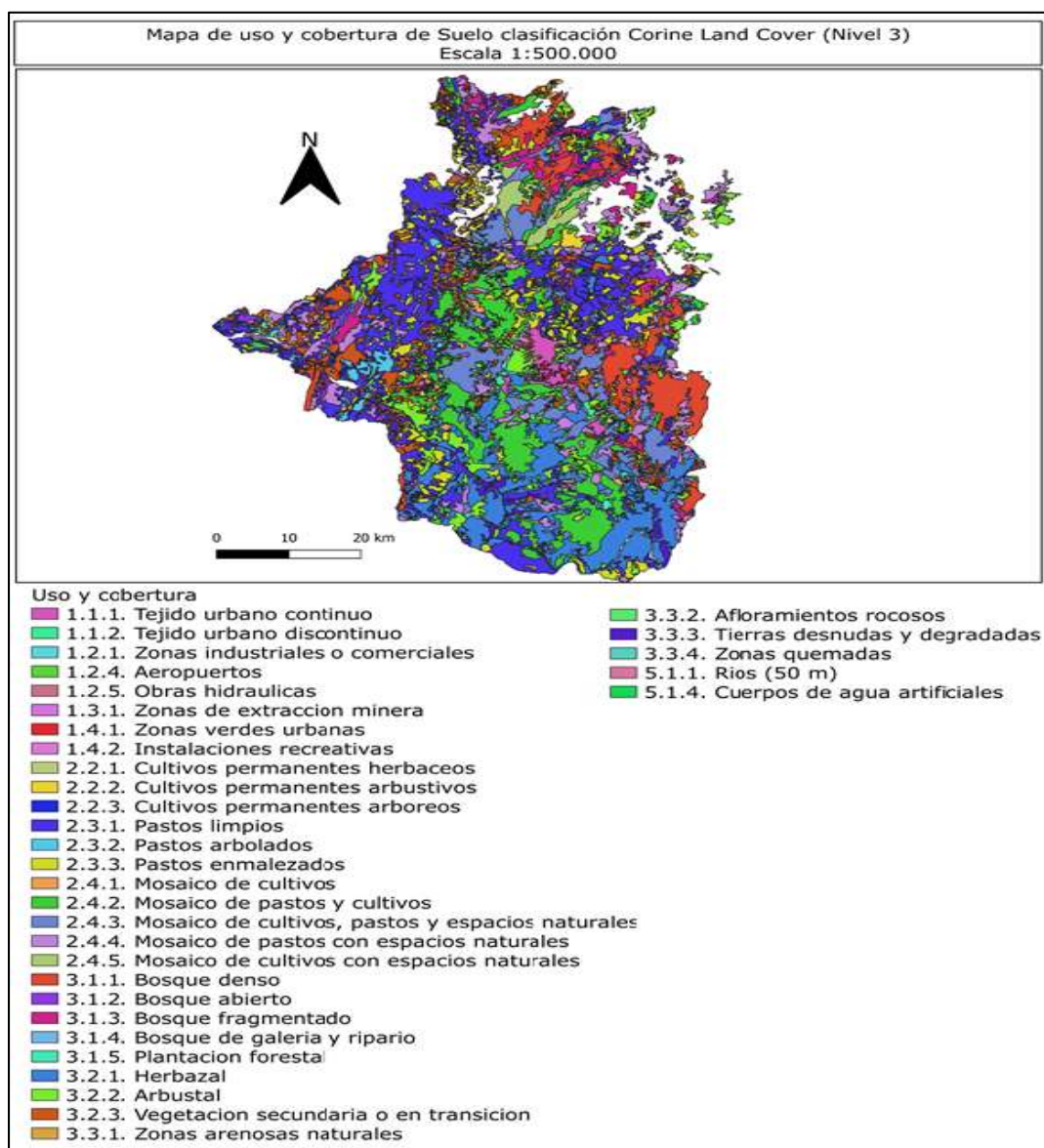
Nota: Adaptado por los autores a partir de información provista por (UIS-AMB, 2019)

El uso y cobertura de suelo en la región está compuesta en su mayoría por pastos limpios (18%), mosaico de pastos y cultivos (13%), herbazal (11%) y mosaico de pastos con espacios

naturales (9%). Existe una tendencia de distribución espacial de la cobertura de tal manera que en la parte oriental se encuentra la mayor parte de bosques, al occidente la mayoría de área está cubierta por vegetación secundaria, en la zona sur la mayor cantidad de herbazal y finalmente al norte se encuentra en su mayoría cubierto por áreas agrícolas (Mapa 6).

Mapa 6

Mapa de uso y cobertura del suelo en la zona de estudio.



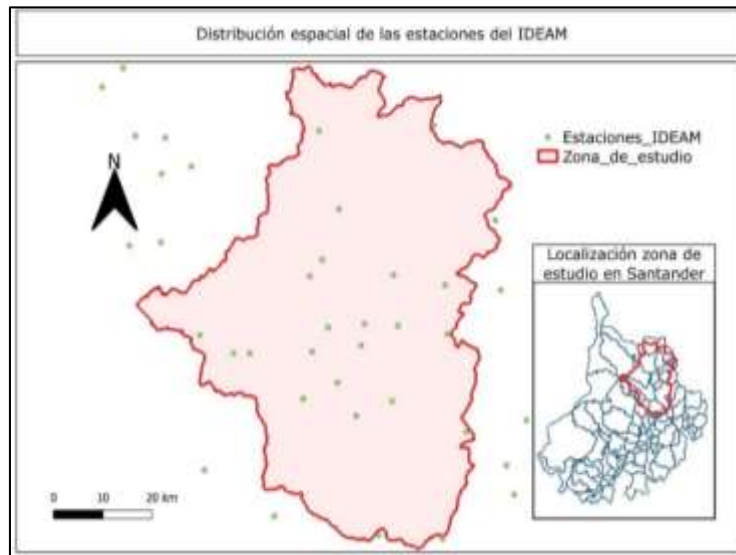
Nota: Adaptado por los autores a partir de información provista por (UIS-AMB, 2019). Las clasificaciones corresponden con la metodología Corine Land Cover de tercer nivel (Apéndice D).

3.2. Información de precipitación para el área de estudio

Las series de datos de precipitación se pueden obtener a través de metodologías de medición *in-situ* o por sensores remotos. Los métodos *in-situ* usan estaciones de medición con diferentes tecnologías y especificaciones que proveen series de tiempo de precipitación para ese punto específico donde se hace la medición. Dentro de esta categoría, las estaciones pluviométricas siguen siendo las más predominantes por la simplicidad de sus requerimientos para operación y mantenimiento a pesar de que no garantizan datos de alta calidad. Los métodos basados en sensores remotos miden la precipitación a partir de diferentes tecnologías, ofreciendo la posibilidad de tener una mejor resolución espacial, aunque pueden tener falencias en la caracterización de eventos discretos dada su baja resolución temporal (University Corporation for Atmospheric Research, 2020). Los radares meteorológicos terrestres son una categoría híbrida que combinan las dos estrategias pues la precipitación se mide en el terreno, pero con tecnologías que ofrecen una alta resolución espacial y temporal (NASA, 2013). En Colombia, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) es la entidad encargada de administrar la red de estaciones hidrometeorológicas del país. La entidad cuenta con una red de estaciones de diferentes tipos que miden precipitación *in-situ* a partir de tecnologías básicas y avanzadas, reportando series de tiempo de precipitación en intervalos diarios, mensuales y anuales. Esta información es asequible a través del Sistema de Información para la Gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos (DHIME) (IDEAM, 2021). Para nuestra área de estudio existen 40 estaciones activas (Mapa 7) con rangos temporales de disponibilidad de información variable que, para el caso más favorable, inician desde el año 1956 y en el caso más desfavorable inician desde 2005, hasta la actualidad.

Mapa 7

Distribución espacial de estaciones IDEAM en la zona de estudio.



Nota: Adaptado por los autores a partir de información de base de datos (IDEAM, 2021)

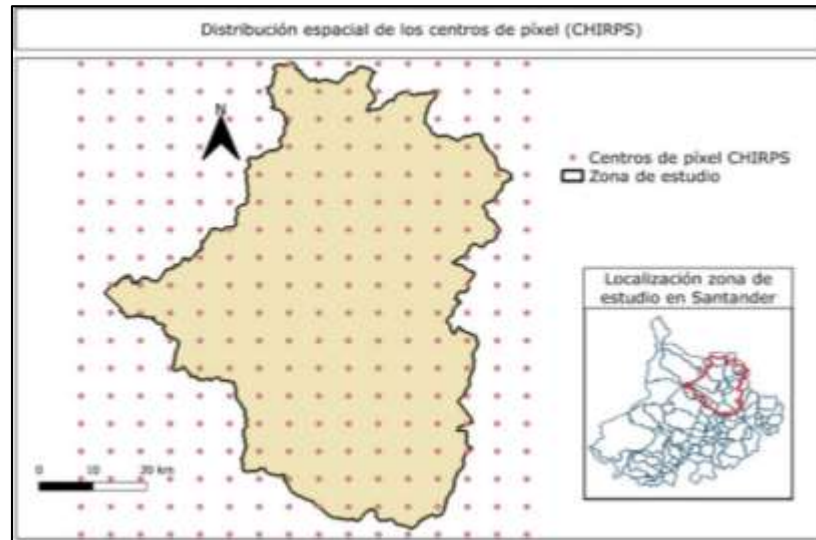
Aunque los datos de precipitación *in-situ* proveen un mejor acercamiento a los valores reales de precipitación en la zona de interés, estos implican una serie de retos relacionados con la falta de uniformidad en las ventanas de tiempo que provee cada estación, el uso de diferentes tecnologías para la recolección de la información, la ausencia de datos dentro de cada serie de tiempo (por fallas técnicas, cambios de tecnología u otras razones) y la distribución no uniforme de la ubicación de las estaciones dentro de la zona de estudio. Es necesario, entonces, evaluar la posibilidad de usar datos de sensores remotos para superar algunos de estos retos.

Existen distintas plataformas que ofrecen datos de precipitación satelital para diferentes zonas del mundo como Disco Ges, PPS casi en tiempo real, API de editor PMM, Giovanni, Portal de mapeo de desastres de la NASA, y CHIRPS. Cada fuente tiene sus propias características de tecnología usada, resolución espacial y temporal y formatos disponibles (Apéndice E). La base de datos de CHIRPS es de especial interés pues integra información satelital y de estaciones en campo para generar datos continuos (espacial y temporalmente) en una resolución espacial de 0.05 x 0.05

grados en una resolución diaria desde 1981, y su extensión de cobertura para el planeta es de 50°S-50°N en todas las longitudes. Esto lo hace particularmente aplicable a las zonas tropicales del planeta (UC Santa Barbara, 2021).

Mapa 8

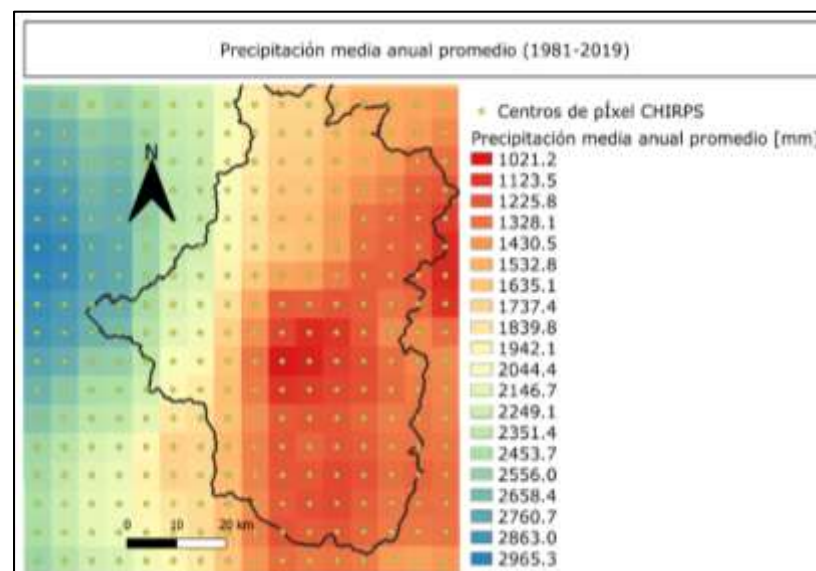
Distribución espacial de centros de pixel cada 5 km para la zona de estudio



Nota: Adaptado por los autores a partir de información provista por (UC Santa Barbara, 2021)

Mapa 9

Precipitación media anual zona de estudio



Nota: Adaptado por los autores a partir de información provista por (UC Santa Barbara, 2021)

La distribución espacial de los centros de pixel de los datos CHIRPS para la zona de estudio se muestra en el (Mapa 8) y la distribución espacial de la precipitación anual promedio para cada pixel se muestra en el (Mapa 9).

3.3. Información de deslizamientos ocurridos en Colombia según base de datos SIMMA

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha realizado un trabajo de integración de los diferentes tipos de movimientos en masa que han ocurrido en el país por medio del Sistema de Información de Movimientos en Masa – SIMMA. El sistema reporta dos grupos de información: el inventario, que integra los movimientos caracterizados por el SGC a partir de trabajo en campo después de la ocurrencia del evento o por análisis de imágenes. Por otra parte, el catálogo es un conjunto de datos más amplio en cantidad pero la información que contiene no tiene el grado de detalle del inventario dado que se soporta en información de noticias de prensa, reportes de la defensa civil y bomberos (Gamboa, 2014; SGC, 2017). La plataforma SIMMA permite la descarga de información espacial en formato SIG y de bases de datos de los movimientos reportados. Este estudio se enfoca en los movimientos reportados por el inventario porque proveen información relacionada con el detonante del movimiento, aspecto que es de especial importancia dados los objetivos de esta investigación.

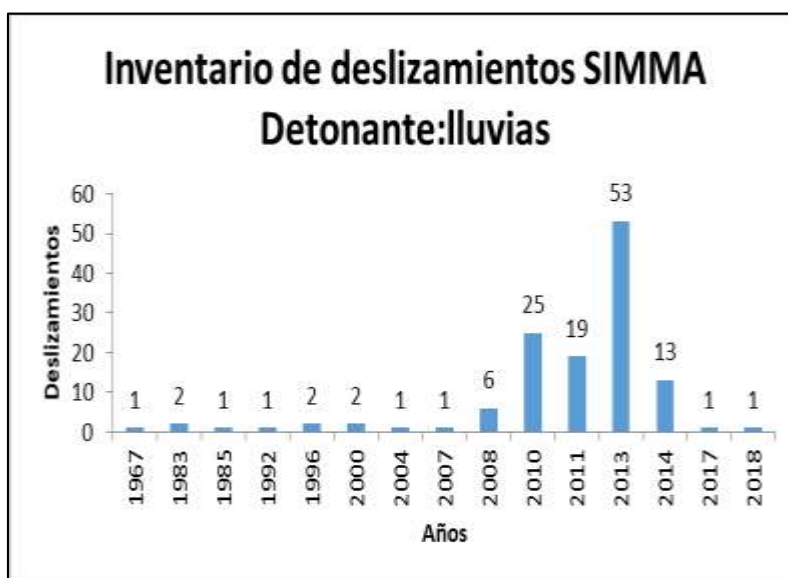
3.3.1. Deslizamientos registrados en Santander

El inventario reporta 129 deslizamientos provocados por lluvias en Santander para el periodo entre 1967 y 2018. La concentración temporal de ocurrencia de movimientos en masa más importante fue para el periodo 2010-2014 con el mayor número de eventos caracterizados para el año 2013 (Figura 5). El análisis de ocurrencia de eventos en escala mensual para el departamento de Santander revela que la ocurrencia de los eventos es consistente en los meses de Julio y Agosto. Vale la pena resaltar que para la zona de estudio el 2010 es el año que presenta mayores registros

de deslizamientos (14 eventos caracterizados) (Figura 6) dispersos en distintas áreas de la zona de estudio (Mapa 10).

Figura 5

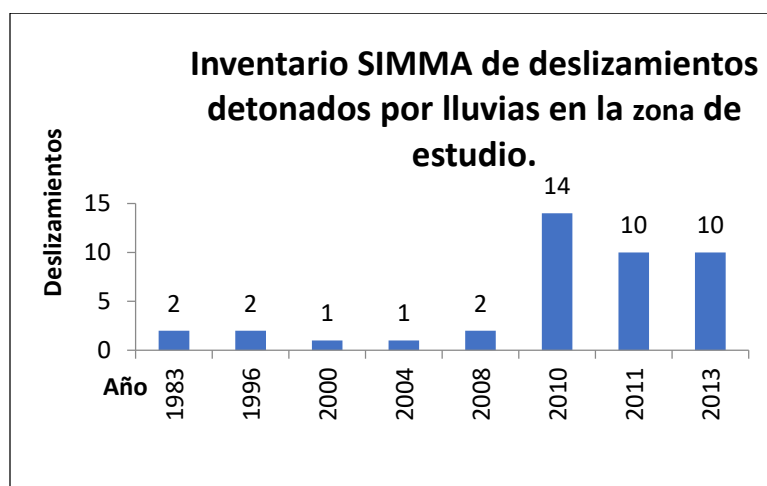
Número de deslizamientos en el inventario SIMMA para Santander en resolución anual.



Nota: Adaptado por los autores a partir de datos obtenidos de (SIMMA, 2021)

Figura 6

Deslizamientos en el SIMMA para la zona de estudio en resolución anual.



Nota: Adaptado por los autores a partir de datos obtenidos de (SIMMA, 2021)

Mapa 10

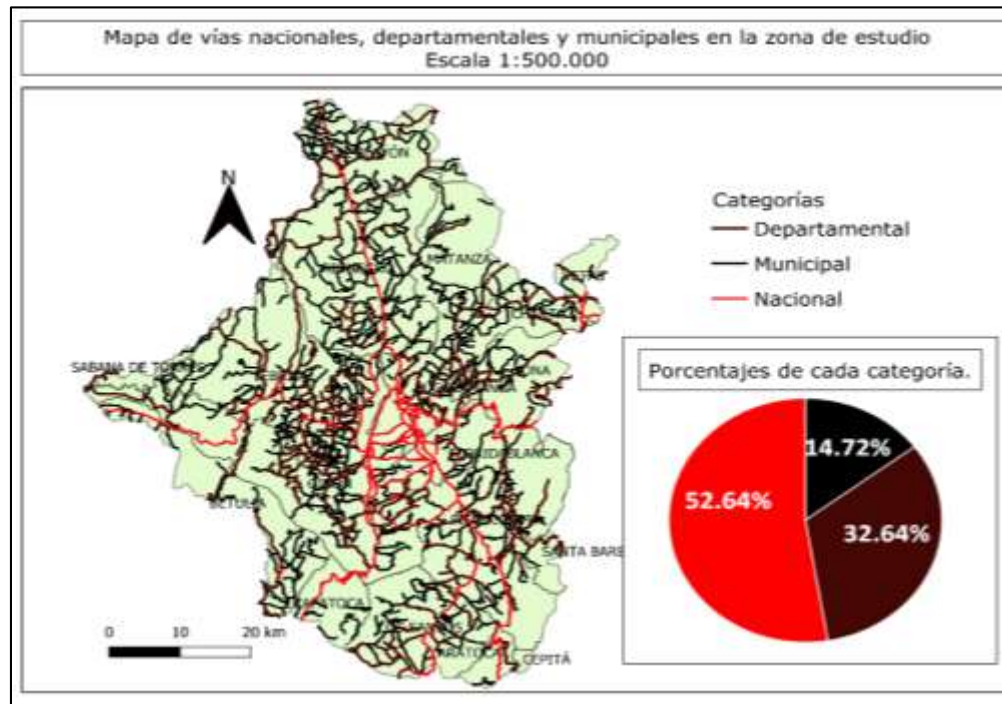
Deslizamientos ocurridos en la zona de estudio, año 2010.



Nota: Adaptado por los autores a partir de SIMMA

3.4. Red vial existente en el área de estudio

Respecto a carreteras nacionales encargas de conectar los departamentos del país, en nuestra zona de estudio se encontraron aproximadamente 493 km de estas, de las cuales en su mayoría están a cargo de la agencia nacional de infraestructura (ANI), el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) y en una porción menor a cargo del departamento. También se encontraron 1094 km de vías encargas de comunicar los municipios entre sí; estas vías en su mayoría están a cargo del departamento y en una pequeña proporción a cargo de los municipios que unen. Adicionalmente se evidencia la existencia de 1764 km de vías municipales las cuales están a cargos de los municipios y una pequeña cantidad de INVIAS (Mapa 11).

Mapa 11*Red vial de la zona de estudio*

Nota: Adaptado por los autores a partir de datos del Geoportal del DANE (<https://geoportal.dane.gov.co>)

4. Metodología**4.1. Estrategia para el cálculo de riesgo**

La estrategia de trabajo se basó en la ecuación general de riesgo (Ecuación 3) que indica que este es producto de la existencia de una amenaza en una zona donde existe vulnerabilidad. Como se planteó en la propuesta de investigación, el cálculo de amenaza utilizó una estrategia cualitativa que partió del planteamiento del método Mora–Vahrson (Ecuación 4) pero se adaptó a las condiciones de nuestro problema de interés en dos aspectos: (1) no se tuvo en cuenta el índice de sismicidad y (2) se evaluaron diferentes descriptores de precipitación buscando identificar los que produjeran una mayor variabilidad espacial. Dado que el objeto de este trabajo está orientado a la evaluación del riesgo climatológico para la infraestructura vial, la vulnerabilidad (V) fue establecida en términos de la presencia/ausencia de vías en el área de estudio.

4.2. Análisis de descriptores de precipitación

Con el fin de obtener datos de precipitación con la mejor resolución espacial posible, se trabajó con la información provista por la plataforma CHIRPS 2.0 que integra información satelital y de estaciones en campo para generar datos continuos en una resolución espacial de 0.05×0.05 grados en una escala temporal diaria desde 1981, para las áreas del planeta localizadas entre las latitudes 50°S - 50°N en todas las longitudes (UC Santa Barbara, 2021). El análisis se soportó en información de precipitación diaria y precipitación media mensual desde 1981 hasta 2019 para cada centro de pixel en la zona de estudio. Esta información se obtuvo a partir de un proceso de extracción de la información de interés de los archivos netCDF descargados de la plataforma, usando un script desarrollado en el código R (Ficklin & Barnhart, 2014).

El período de análisis seleccionado fue el año 2010 pues, de acuerdo con el inventario de deslizamientos SIMMA, este fue el año en que ocurrió la mayor cantidad de deslizamientos por precipitación en el área de estudio y este período es coincidente con la teleconexión ENSO (La Niña) (SIMMA, 2021).

Debido a la limitación de resolución diaria de los datos de precipitación se evaluó una serie de descriptores que incluyeron una combinación entre lo propuesto en la literatura y nuestra percepción de lo que podría ser un buen indicador usando una serie de datos diaria de precipitación. De manera general, se evaluaron los descriptores de lluvia acumulada (E) e intensidad (I), con sus respectivos ítems como se muestra en la Tabla 23, todos ellos con un rango de valores entre 0 y 1, siendo el valor de 1 el indicativo de mayor precipitación en cantidad o intensidad. Los cinco ítems de intensidad (IMAX) fueron normalizados de acuerdo con el valor máximo observado en el ráster del ítem estudiado, siguiendo la Ecuación 12.

Ecuación 12

$$Vi_{normalizada} = \frac{Vi}{Vi_{max}}$$

donde,

$Vi_{normalizada}$: Variable de precipitación i normalizada

Vi : valor de la variable i

Vi_{max} : Máximo valor de variable i observado en el ráster

La lluvia acumulada para cada centro de pixel en el área de estudio fue normalizada de dos maneras: con el valor máximo observado en el ráster del ítem estudiado, EMAX (Ecuación 12), y con la precipitación media anual promedio (MAP, 1981-2019) del ráster del ítem estudiado (Ecuación 13).

Ecuación 13

$$EMAP(i) = \frac{E(i)}{MAP}$$

donde,

$E(i)$: ítem de lluvia acumulada

MAP: precipitación media anual promedio del ráster

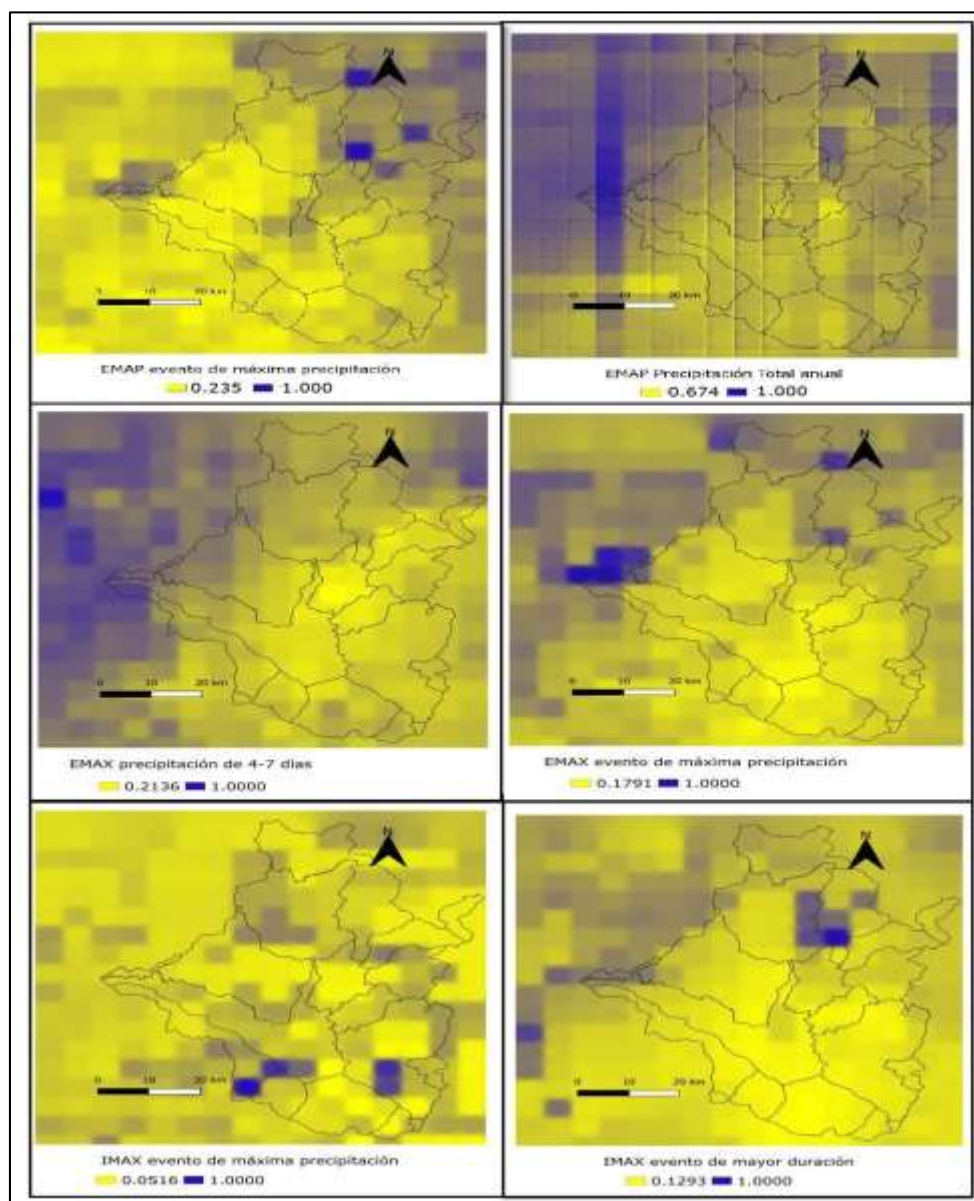
Los valores de lluvia acumulada normalizada por el MAP (EMAP) fueron posteriormente normalizados entre 0 y 1 dividiendo por el valor máximo de EMAP observado en el ráster para así garantizar la ocurrencia del intervalo entre 0 y 1, haciendo así comparables todos los rasters evaluados.

Tabla 23*Descriptores de precipitación*

Descriptor	Ítem
EMAX Lluvia acumulada, normalizada con el valor máximo	Precipitación total anual
	Promedio de lluvias de 1 día
	Promedio de lluvias de 2 días
	Promedio de lluvias de 3 días
	Promedio de lluvias de 4-7 días
	Evento de máxima magnitud de precipitación
EMAP* Lluvia acumulada, normalizada con la precipitación media anual promedio	Precipitación total anual
	Promedio de lluvias de 1 día
	Promedio de lluvias de 2 días
	Promedio de lluvias de 3 días
	Promedio de lluvias de 4-7 días
	Evento de máxima magnitud de precipitación
IMAX Intensidad, normalizada con el valor máximo	Intensidad promedio de lluvias de 1 día
	Intensidad promedio de lluvias de 2 días
	Intensidad promedio de lluvias de 3 días
	Intensidad de precipitación del evento de mayor duración
	Intensidad de precipitación del evento de máxima magnitud

Nota: Autores

Las superficies generadas para los 17 descriptores de precipitación propuestos en la Tabla 23 se encuentran en el Apéndice F. De estas 17 superficies se seleccionaron dos de cada descriptor que mostraron una distribución espacial más clara. Esto, para simplificar el análisis y la selección final del descriptor a usar para el cálculo del riesgo. Las seis superficies seleccionadas fueron: EMAP usando el acumulado de la precipitación total anual [EMAP1] y el acumulado del evento de máxima precipitación [EMAP2]; EMAX usando el acumulado de precipitación entre cuatro y siete días [EMAX1] y el acumulado del evento de máxima precipitación [EMAX2]; finalmente, IMAX usando el acumulado del evento de máxima precipitación [IMAX1] y el acumulado del evento de máxima duración [IMAX2] (Figura 7).

Figura 7*Panel de ráster de descriptores de precipitación preseleccionados*

Nota: Autores a partir de información provista por (UC Santa Barbara, 2021)

4.3. Factores condicionantes

La selección de los factores condicionantes a usar se soportó en criterios establecidos en otros estudios (L. J. P. Londoño, 2017), en la metodología del cálculo de la amenaza de Mora-Vahrson, y en la disponibilidad de información para la zona de estudio. Se usaron tres factores

condicionantes: uso y cobertura del suelo, permeabilidad del suelo, y pendientes. La información de uso y cobertura y de permeabilidad se tomó directamente de la fuente (UIS-AMB, 2019) mientras que el mapa de pendientes fue generado a partir del modelo digital de elevación (DEM) provisto. Los mapas originales fueron recortados usando como límite el polígono exterior del área de estudio y, posteriormente, fueron reclasificados de acuerdo con la susceptibilidad a deslizamientos. Se llevó a cabo una transformación de formato vectorial a formato ráster con resolución de 12.5 x 12.5 m, usando la conversión propuesta por Waldo Tobler (1987) teniendo en cuenta que la escala de mayor resolución fue 1:25000. De acuerdo con el grado de susceptibilidad se asignó a cada categoría un valor numérico de la siguiente manera: muy alta 1; alta, 0.8; media, 0.6; baja, 0.4; muy baja, 0.2. La reclasificación realizada a cada uno de los factores condicionantes se presenta a continuación.

4.3.1. Pendiente

La reclasificación se basó en la categorización propuesta por (Mora & Vahrson, 1991) (Tabla 6) dado que fue la propuesta que mejor se ajustó a la variabilidad de altitudes presentes en la zona (Tabla 24).

Tabla 24

Susceptibilidad a deslizamientos de acuerdo con la reclasificación de pendiente propuesta.

Valor	Susceptibilidad
0° – 8.5°	Muy baja
8.5° – 16.7°	Baja
16.7° – 26.6°	Media
26.6° – 45°	Alta
>45°	Muy Alta

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Mora & Vahrson, 1991)

4.3.2. Uso y Cobertura

La reclasificación del uso y cobertura se soportó en dos fuentes por la variedad de categorías existentes en el área de estudio (Tabla 25). La base principal fue la categorización de (Pisano et al., 2017) (Tabla 9), pero se complementó con la propuesta de (Suárez, 1998) (Tabla 10).

Tabla 25

Susceptibilidad a deslizamientos según la reclasificación de uso y cobertura de suelo

Descripción Corine land cover N3	Susceptibilidad
3.3.1. Zonas arenosas naturales 3.3.3. Tierras desnudas y degradadas 3.3.4. Zonas quemadas 1.3.1. Zonas de extracción minera 2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos 2.3.1. Pastos limpios 2.4.1. Mosaico de cultivos	Muy Alta
1.2.5. Obras hidráulicas 2.3.3. Pastos enmalezados 2.3.2. Pastos arbolados 2.4.2. Mosaico de pastos y cultivos 2.2.2. Cultivos permanentes arbustivos 3.2.1. Herbazal 3.2.2. Arbustal 5.1.1. Ríos (50m) 5.1.4. Cuerpos de agua artificiales	Alta
1.1.2. Tejido urbano discontinuo 1.2.1. Zonas industriales o comerciales 1.4.1. Zonas verdes urbanas 1.4.2. Instalaciones recreativas 2.4.3. Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales 2.4.4. Mosaico de pastos con espacios naturales	Media
3.1.3. Bosque fragmentado 2.2.3. Cultivos permanentes arbóreos 1.2.4. Aeropuertos 1.1.1. Tejido urbano continuo 3.3.2. Afloramientos rocosos	Baja
3.1.1. Bosque denso 3.1.2. Bosque abierto 3.1.4. Bosque de galería y ripario 3.1.5. Plantación forestal	Muy baja

Nota: Adaptado por los autores a partir de (Pisano et al., 2017; Suárez, 1998)

4.3.3. Infiltración (permeabilidad)

La capacidad de infiltración se caracterizó en términos de la permeabilidad del suelo. La reclasificación se llevó a cabo a partir de la categorización realizada por (Badillo & Rodríguez, 2005) (Tabla 26).

Tabla 26

Susceptibilidad a deslizamientos según la reclasificación de permeabilidad

Coeficiente de permeabilidad cm/s	Susceptibilidad
$>10^{-1}$	Muy baja
$10^{-1} - 10^{-3}$	Baja
$10^{-3} - 10^{-5}$	Media
$10^{-5} - 10^{-7}$	Alta
$<10^{-7}$	Muy alta

Nota: Adaptado por los autores a partir de mecánica de suelos (Badillo & Rodríguez, 2005)

5. Resultados

5.1. Ecuación para el cálculo del riesgo climatológico a la infraestructura vial

El indicador de riesgo climatológico propuesto tiene un rango entre 0 y 1 correspondiente a la escala muy bajo (menor que 0.2), bajo (entre 0.2 y 0.4), medio (entre 0.4 y 0.6), alto (entre 0.6 y 0.8) y muy alto (mayor que 0.8), y se calcula a partir del producto de la amenaza y la vulnerabilidad,

Ecuación 14

$$R = [I_{pen} * I_{per} * I_{uc} * (P_i)] \times V$$

donde, I_{pen} , I_{per} , I_{uc} son los índices asociados a los factores condicionantes seleccionados (pendientes, permeabilidad del suelo y uso y cobertura), P_i es el índice asociado al factor detonante de precipitación, y V es la vulnerabilidad establecida por la presencia de vías en el área de estudio.

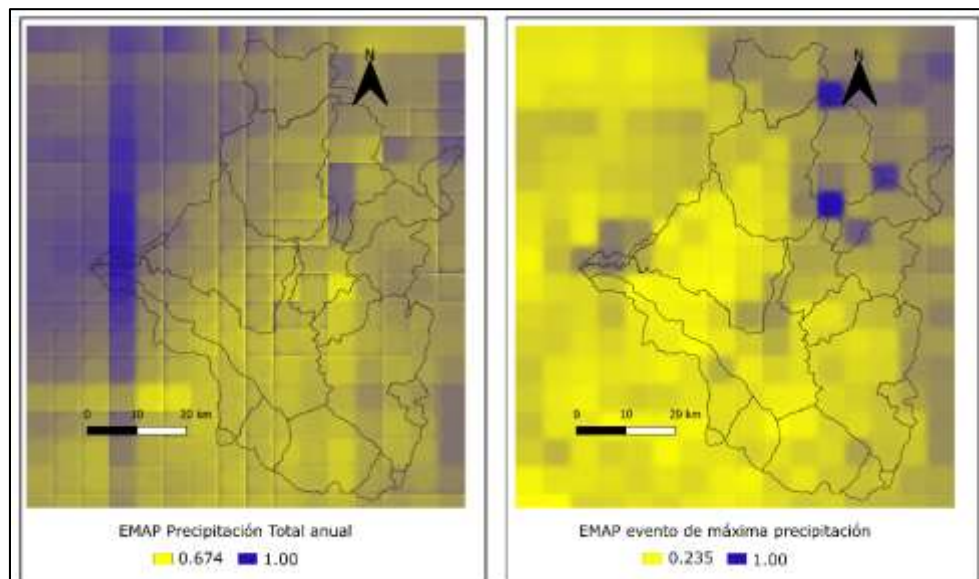
5.2. Piloto de cálculo de riesgo climatológico para el área de estudio

5.2.1. EMAP como índice descriptor de precipitación (P_i)

La revisión de la literatura y la resolución temporal de la información de precipitación determinaron los posibles descriptores de precipitación para el área de estudio. Una vez evaluadas las superficies preseleccionadas (Figura 7) se tomó la decisión de usar EMAP (Figura 8) porque los parámetros usados para la construcción del índice tienen buen soporte en la literatura y porque la distribución espacial ofrecida por el indicador es consistente con los patrones de ocurrencia de deslizamientos desencadenados por eventos de precipitación en el área de estudio para el año de análisis. Sin embargo, como la definición de la mayor relevancia de uno de ellos debe obedecer a un análisis estadístico usando los eventos históricos de deslizamientos por precipitación, se decidió trabajar con los dos descriptores, interpretándolos como evidencia del rango de incertidumbre que puede existir en este análisis cualitativo. Estos descriptores tienen un rango de valores entre 0 y 1 a lo largo de la superficie, donde 1 hace referencia al máximo valor observado.

Figura 8

Superficies de los descriptores de precipitación EMAP 1 y EMAP 2



Nota: Autores a partir de información provista por (UC Santa Barbara, 2021)

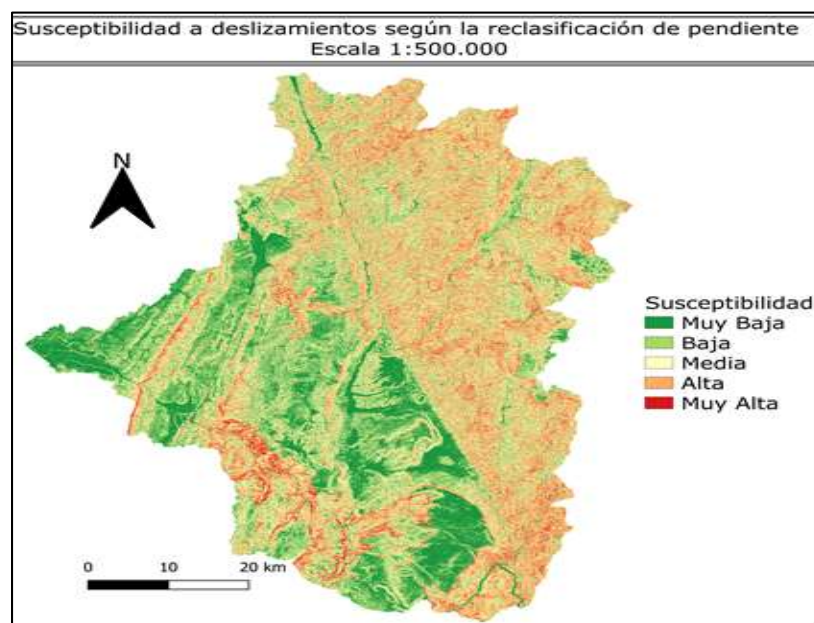
5.2.2. Susceptibilidad a deslizamientos de los factores condicionantes

Las reclasificaciones de los tres factores condicionantes seleccionados permiten conocer la distribución espacial de la susceptibilidad a deslizamientos para cada uno de ellos. Estas susceptibilidades se traducen al final en los índices *I_{pen}*, *I_{per}*, *I_{uc}* para el cálculo de la amenaza, con una distribución de valores entre 0 y 1 correspondientes a susceptibilidad muy baja (menor que 0.2), baja (entre 0.2 y 0.4), media (entre 0.4 y 0.6), alta (entre 0.6 y 0.8) y muy alta (mayor que 0.8).

La distribución espacial de susceptibilidad a deslizamientos por pendientes sugiere que el 4% de la zona de estudio tiene una susceptibilidad muy alta, 28% alta, 26% media, 24% baja y 18% susceptibilidad muy baja (Mapa 12). Las susceptibilidades muy altas se encuentran en algunos sectores de la zona occidental y suroccidental y las susceptibilidades medias y altas, en su mayoría, se localizan al costado oriental de la falla de Bucaramanga.

Mapa 12

Ráster de susceptibilidad a deslizamientos por pendientes

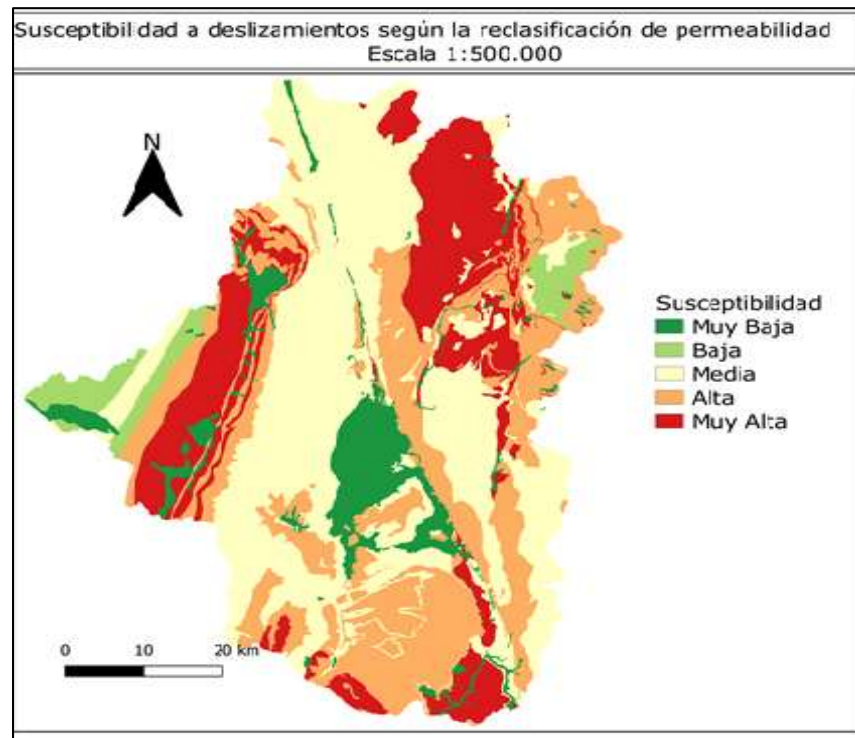


Nota: Autores.

La susceptibilidad a deslizamientos por permeabilidad indica que el 20% del área de estudio tiene susceptibilidad muy alta, 28% susceptibilidad alta, 40% susceptibilidad media, 4% susceptibilidad baja y 8% susceptibilidad muy baja (mapa 13).

Mapa 13

Ráster de susceptibilidad a deslizamientos por permeabilidad

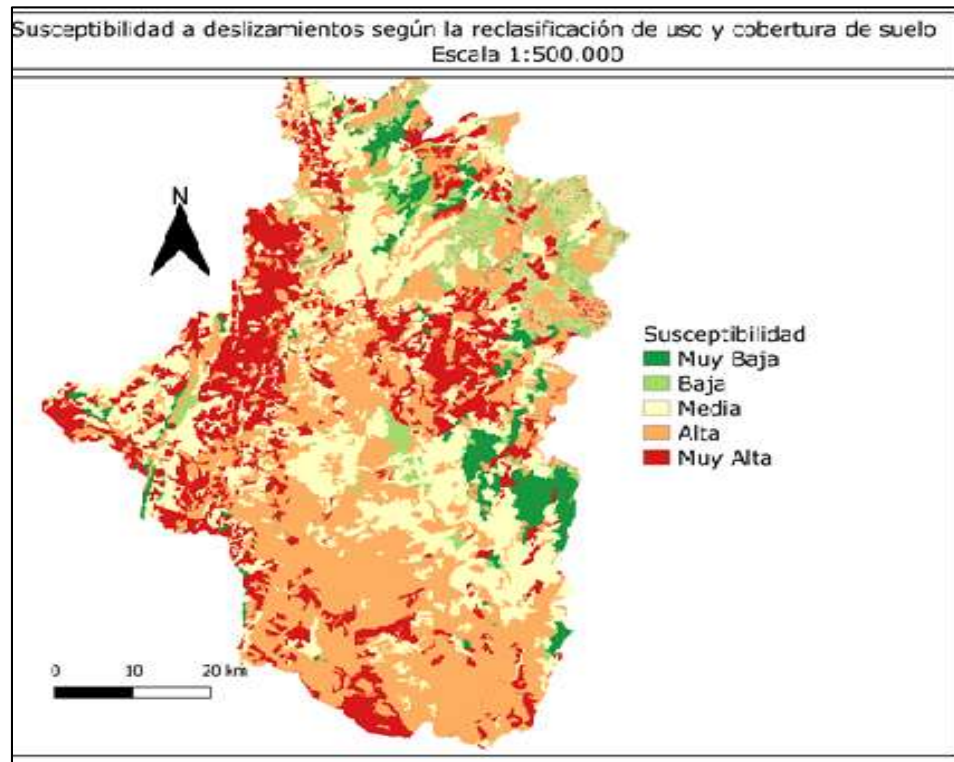


Nota: Autores.

Finalmente, la susceptibilidad a deslizamientos por uso y cobertura muestra condiciones de susceptibilidad muy alta en el 20% del área, altas en el 38% del área, media el 27% del área, baja en el 4% del área y muy baja en el 11% del área (mapa 14).

Mapa 14

Ráster de susceptibilidad a deslizamientos por uso y cobertura de suelo



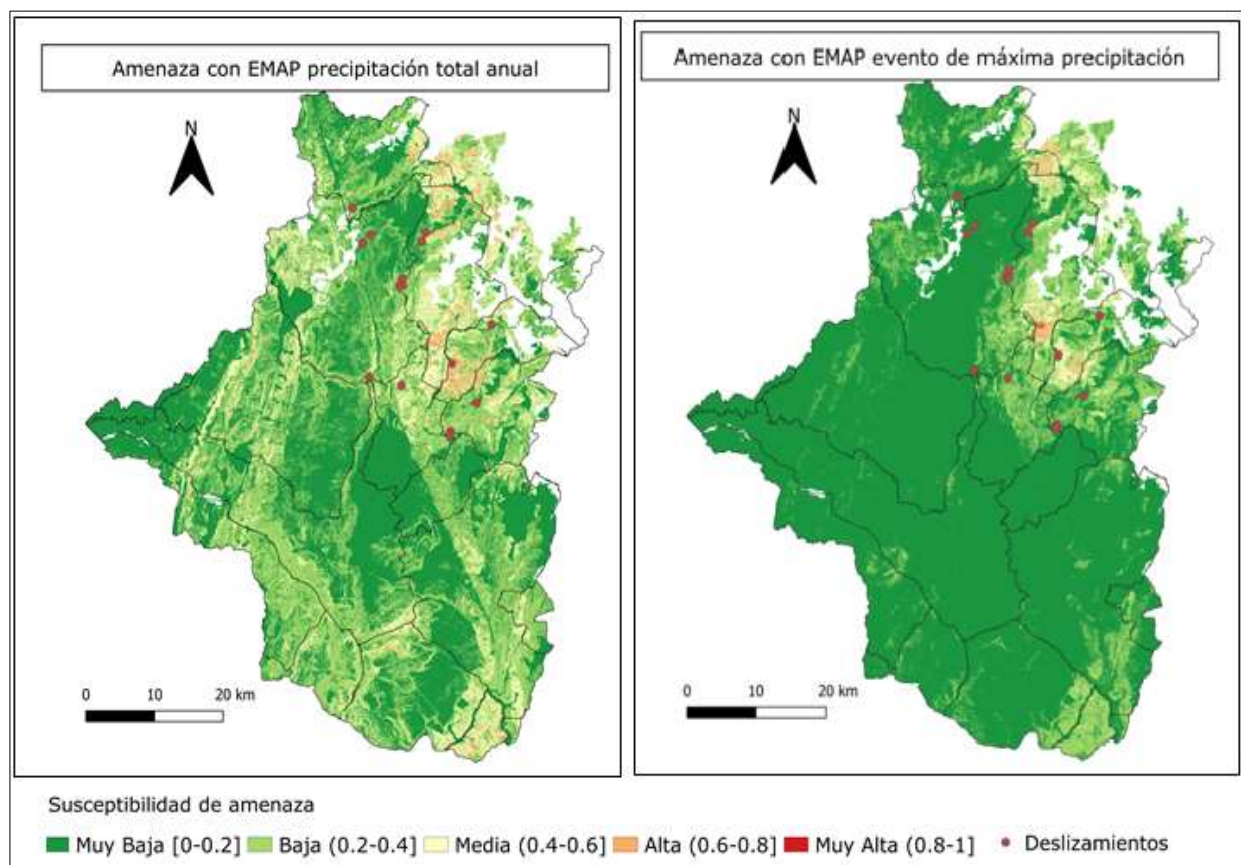
Nota: Autores.

5.2.3. Amenaza por precipitación en el área de estudio

La ecuación adaptada de la propuesta de Mora-Vahrson para la determinación de la amenaza ($A = I_{pen} * I_{per} * I_{uc} * (P_i)$) permitió zonificar el área de estudio en un gradiente de valores entre 0 y 1 donde 1 corresponde a las condiciones de amenaza más alta. Independientemente del EMAP usado, se evidencia una concordancia entre los eventos de deslizamiento por precipitación reportados en el SIMMA para el año de implementación y las áreas de amenaza media, alta y muy alta localizadas en el sector nororiental del área de estudio (Mapa 15). Los puntos más álgidos de amenaza están en la zona sureste de Matanza y la zona suroeste del municipio de Charta (Mapa 16).

Mapa 15

Zonificación de la Amenaza con descriptores de precipitación EMAP 1 y EMAP 2

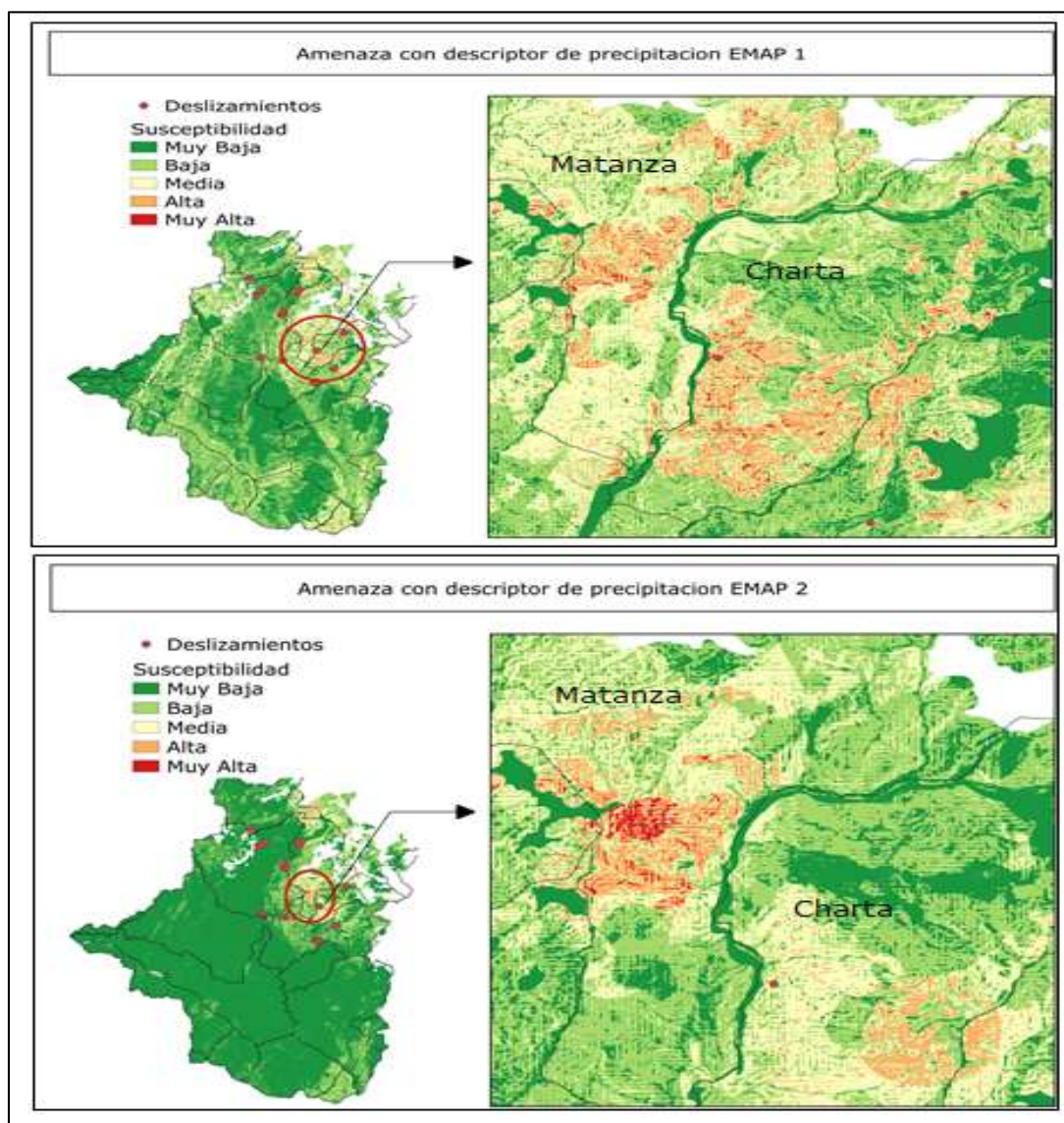


Nota: Autores.

Aunque no es claro si el inventario de deslizamientos del SIMMA incluye el total de los eventos ocurridos en el área de estudio o solo algunos reportados y estudiados a profundidad por el Servicio Geológico Colombiano, al superponer los eventos SIMMA del 2010 sobre las 17 superficies de amenaza generadas por los diferentes descriptores de precipitación (Apéndice G), se evidencia que, en general, hay concordancia entre las amenazas más altas en la región nororiental y los deslizamientos inventariados.

Mapa 16

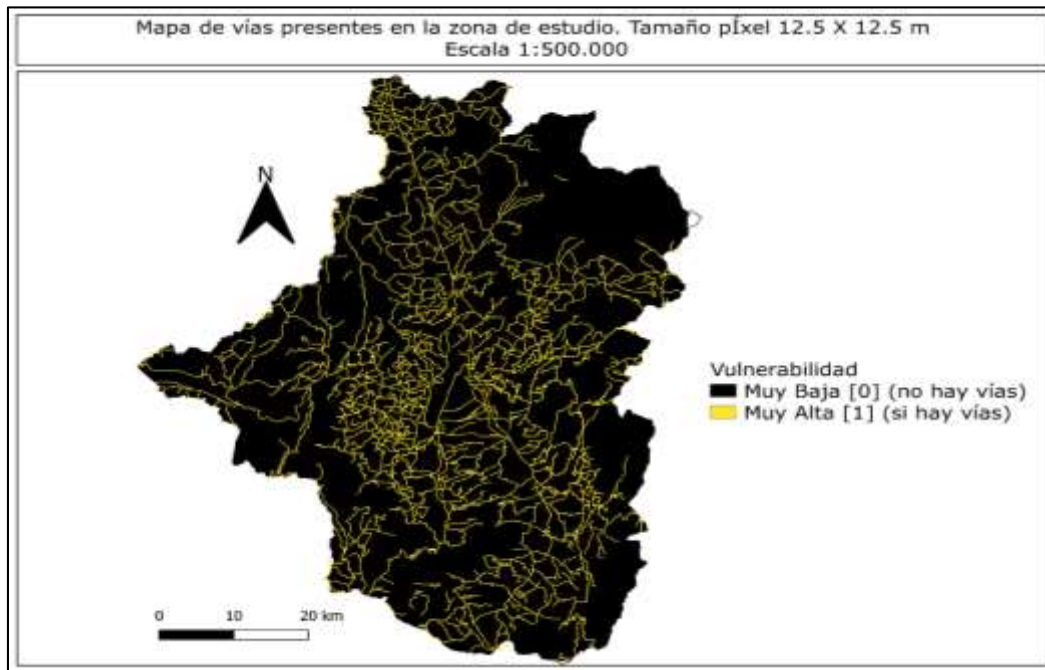
Zonificación de amenaza Matanza y Charta.



Nota: Autores

5.2.4. Vulnerabilidad

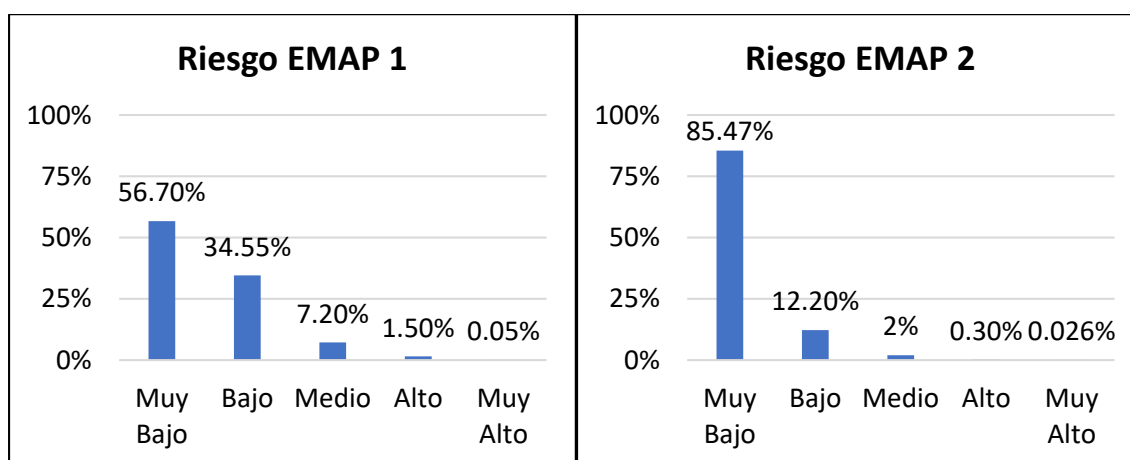
La vulnerabilidad por ausencia/presencia de infraestructura vial en la zona de estudio se representa en un ráster binario que tiene valores “0” cuando el pixel no contiene elementos de red vial, y valores “1” si existen estos elementos en el pixel (Mapa 17).

Mapa 17*Mapa de vulnerabilidad según la presencia/ausencia de vías*

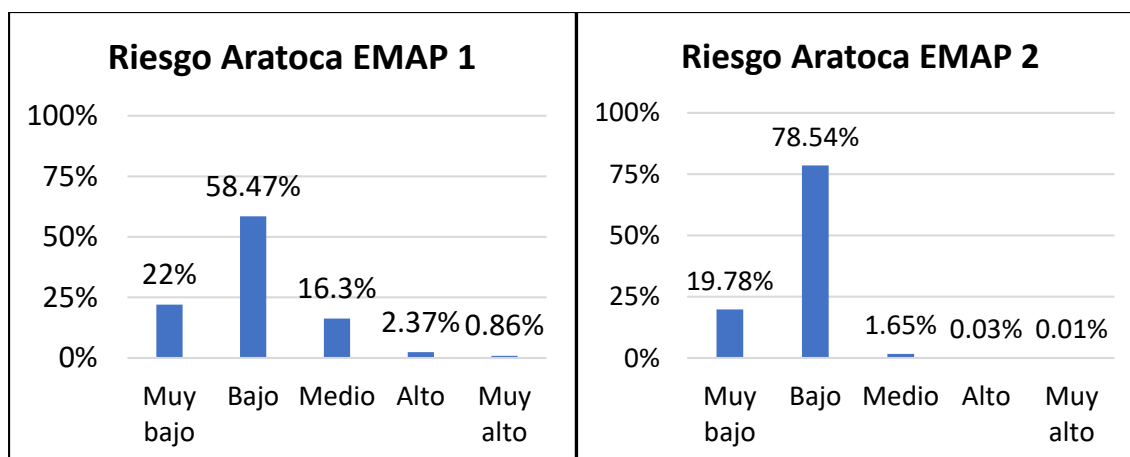
Nota: Autores

5.2.5. Riesgo climatológico a la infraestructura vial en la zona de estudio

El riesgo climatológico para la infraestructura vial se calculó implementando la Ecuación 14 en cada píxel de la zona de estudio. Dado el carácter binario de la vulnerabilidad, el riesgo se obtuvo únicamente para los píxeles que contienen infraestructura vial. En general, la distribución espacial del riesgo es coincidente con la distribución espacial de la amenaza. Aunque el riesgo alto no predomina en nuestra zona de estudio, este se encuentra distribuido en algunos municipios del sector nororiente de la zona de estudio como lo son Charta, Matanza y El Playón. La mayoría de la red vial se encuentra en riesgo bajo y muy bajo (91.3% con EMAP 1 y 97.7% con EMAP 2) (Figura 9). Esto es deseable pues permitiría a los municipios enfocarse en los tramos de vía con riesgo medio a muy alto (8.7% con EMAP 1 y 2.3% con EMAP 2).

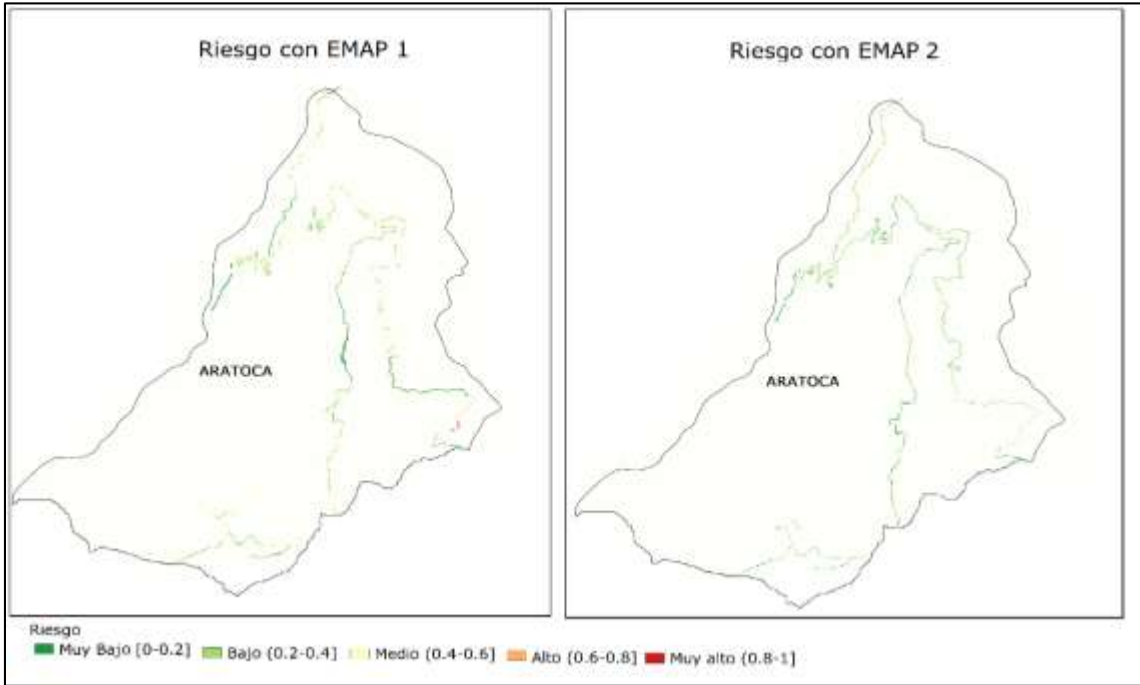
Figura 9*Distribución porcentual del riesgo en el área de estudio*

Dado que las inversiones en vías terciarias se realizan en su mayoría a nivel municipal, se presenta a continuación dos escenarios; uno de un municipio con riesgo general bajo (municipio de Aratoca) y otro de un municipio con mayor existencia de alto riesgo (municipio de Charta). Para el municipio de Aratoca, la distribución del riesgo es alto a muy alto para el 3.23% de la infraestructura vial del municipio cuando se usa el descriptor de precipitación EMAP 1 y 0.04% con el descriptor EMAP 2 (Figura 10). La zonificación de este riesgo alto y muy alto se distribuye espacialmente en la zona este del municipio (Mapa 18).

Figura 10*Distribución porcentual del riesgo en Aratoca*

Mapa 18

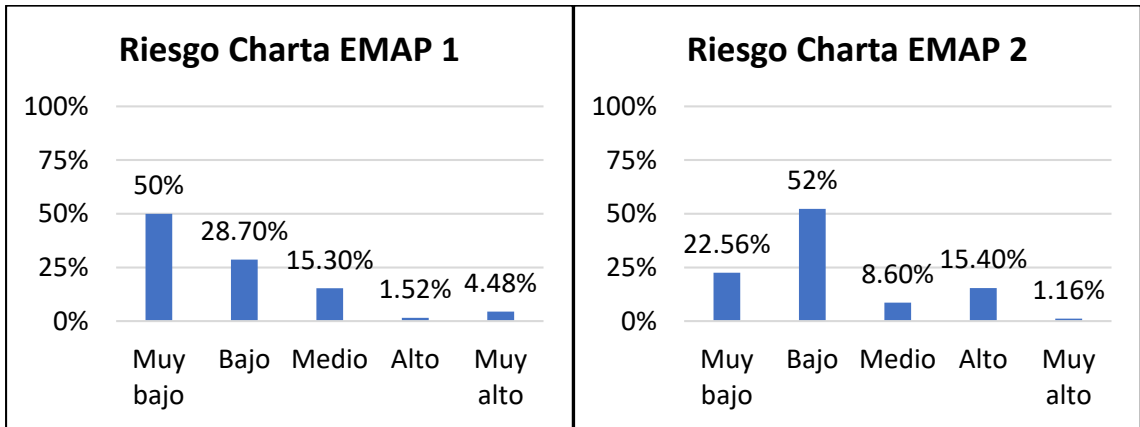
Zonificación de riesgo en Aratoca con EMAP 1 y EMAP 2

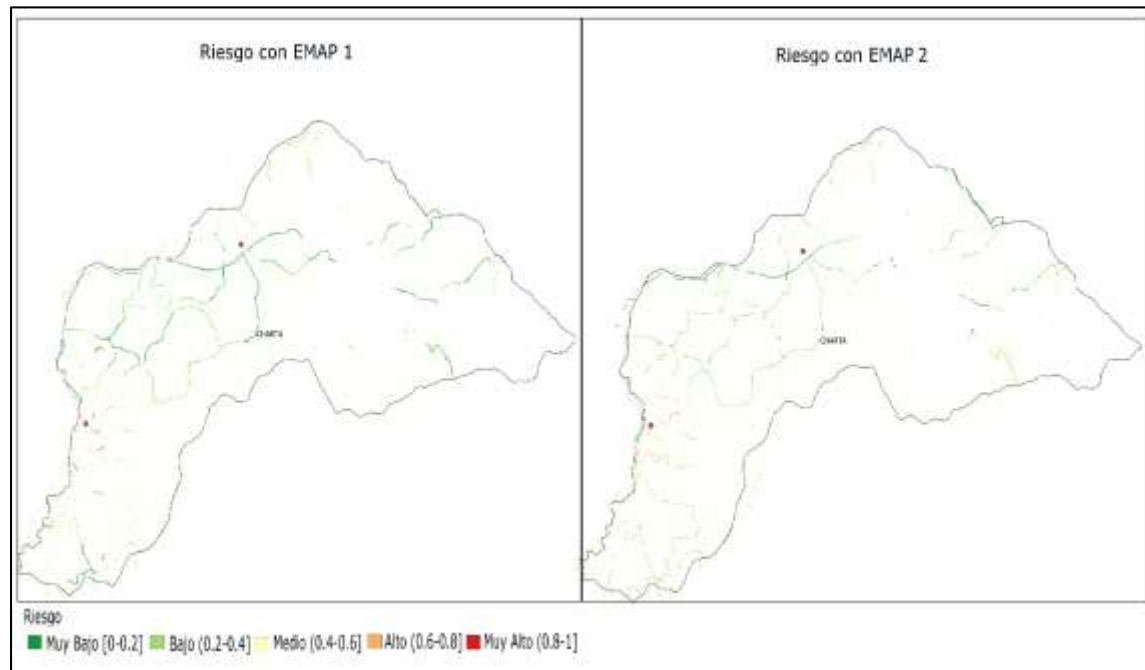


En el municipio de Charta la distribución del riesgo es alto a muy alto para el 6% de la infraestructura vial del municipio cuando se usa el descriptor de precipitación EMAP 1 y 16.56% con el descriptor EMAP 2 (Figura 11). La zonificación de este riesgo alto a muy alto se focaliza principalmente en la zona suroccidental del municipio (Mapa 19).

Figura 11

Distribución porcentual del riesgo en Charta



Mapa 19*Zonificación de riesgo en Charta con EMAP 1 y EMAP 2***6. Conclusiones**

Este proyecto propone una estrategia para la inclusión del componente de riesgo climatológico por precipitación en la infraestructura vial de una región. Aunque la necesidad se identificó para las vías terciarias, se implementó la estrategia para toda la red vial del área de estudio.

Se sugirió un indicador de riesgo climatológico basado en la evaluación cualitativa de amenaza de Mora-Vahrson y el criterio de presencia/ausencia de infraestructura vial para determinar la vulnerabilidad.

Se estudiaron distintos descriptores de precipitación asociados a eventos extremos y se verificó que, para la resolución temporal de datos de precipitación, la precipitación acumulada normalizada (EMAP) es un descriptor apropiado para usar como factor detonante en el análisis

cualitativo de la amenaza. Aunque la literatura soporta la decisión del descriptor usado, se reconoce que hay un reto relacionado a la diferencia significativa de escalas entre la información usada para los factores condicionantes (alta resolución espacial) y para los factores detonantes (baja resolución espacial). La decisión de usar datos CHIRPS garantizó que hubiese información del factor detonantes para toda el área de estudio.

Se implementó un piloto de la metodología para un área de 3500 km² en el nororiente del departamento de Santander. El cálculo de la amenaza permitió identificar zonas críticas del área de estudio (amenaza alta y muy alta; sureste del municipio de Matanza y suroeste del municipio de Charta). El cálculo del riesgo permitió identificar los tramos críticos de vías que están en riesgo climatológico alto y muy alto. Hay concordancia entre la localización de las zonas de amenaza alta y muy alta del nororiente del área de estudio con la ocurrencia de deslizamientos por precipitación reportados por el SIMMA.

La ventaja de esta propuesta metodológica es que no se soporta en eventos ocurridos y que, dadas las características de la metodología, es posible que sea implementada para evaluar impactos por cambios en el uso del suelo o por cambios en el clima futuro. Es muy importante, sin embargo, que se continúe enriqueciendo la base de datos de deslizamientos y de otros tipos de eventos asociados a la afectación de la infraestructura vial por precipitación para así mejorar el proceso de validación de la metodología propuesta.

Referencias

- Abril, A. L. (2011). Estudio e implementación de un modelo para la zonificación de áreas susceptibles a deslizamiento mediante el uso de sistemas de información geográfica: Caso de estudio sector Quimsacocha [Bachelor Thesis, Universidad De Cuenca]. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/739>
- Acevedo, C. D., & Buitrago, J. H. (2014). Apoyo Técnico en la Elaboración del Mapa Geomorfológico de la plancha 266 Villavicencio, a escala 1:100000 correspondiente a la zona 13. [Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1573?mode=full>
- Akcali, E., Arman, H., Firat, S., Saltabas, L., & Gunduz, Z. (2010). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Trabzon province of Turkey. *International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS)*, 2(4), 14-26. <https://doi.org/10.31873/IJEAS>
- Alcántara, A. I., Esteban, C. O., & Parrot, J. F. (2006). Landsliding related to land-cover change: A diachronic analysis of hillslope instability distribution in the Sierra Norte, Puebla, Mexico. *CATENA*, 65(2), 152-165. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.11.006>
- Ángulo, R. (2011). Análisis de la susceptibilidad ante peligros por movimientos en masa en laderas. En *Manual de estimación del riesgo ante movimientos en masa en laderas* (Instituto Nacional de Defensa Civil, pp. 37-93). INDECI. <https://www.indeci.gob.pe>
- Aparicio, F. J. M. (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie* (8. reimpr). Limusa Noriega Ed.
- Aristizábal, E., Gamboa, M. F., & Leoz, F. J. (2010). Sistema de alerta temprana por movimientos en masa inducidos por lluvia para el valle de aburrá, Colombia. *Revista EIA*, 7(13), 15. <https://revistas.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/239>

- Aristizábal, E., González, T., Montoya, J. D., Vélez, J. I., Martínez, H., & Guerra, A. (2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, 15(1), 95-111.
- Bacchini, M., & Zannoni, A. (2003). Relations between rainfall and triggering of debris-flow: Case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3(1/2), 71-79. <https://doi.org/10.5194/nhess-3-71-2003>
- Badillo, J., & Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de suelos. Fundamentos* (segunda, Vol. 1). Limusa Noriega Editores.
- Barberio, S., Rabuffetti, D., & Zaccaglino, M. (2004). Una metodologia per la definizione delle soglie pluviometriche a supporto dell'emissione dell'allertamento. *Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, 29, 211-217. <https://core.ac.uk/download/pdf/74324047.pdf>
- Beguiría, S. (2006). Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology*, 74(1-4), 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.07.018>
- Bogaard, T., & Greco, R. (2018). Invited perspectives: Hydrological perspectives on precipitation intensity-duration thresholds for landslide initiation: Proposing hydro-meteorological thresholds. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), 31-39. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-31-2018>
- Bransford, J., & Stein, B. S. (1984). *The ideal problem solver: A guide for improving thinking, learning, and creativity* (2nd ed). W.H. Freeman.

- CAF Banco de Desarrollo de América Latina. (2018). Carreteras, cambio climático y medidas de adaptación. <https://www.caf.com/es/conocimiento/visiones/2018/10/carreteras-cambio-climatico-y-medidas-de-adaptacion/>
- Caine, N. (1980). The Rainfall Intensity: Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows. Taylor & Francis Ltd., 62(1), 23-27. <https://www.jstor.org/stable/520449>
- Calderón, K., & Cuellar, N. (2019). Cambio Climático y Resiliencia en Carreteras. 118.
- Camposano, G. M. (2016). Análisis del comportamiento del suelo por infiltración en una ladera y su relación ante el deslizamiento superficial de Cercos [Magister]. UPC Barcelonatech.
- Castellanos, R. (1996). Lluvias críticas en la evaluación de amenaza de eventos de remoción en masa. Universidad Nacional de Colombia.
- Ceccarini, P., Focardi, P., & Zanchi, C. (1981). Modello per la previsione delle oscillazioni di falda in funzione dei parametri climatici. Istituto Sperimentale Studio Difesa Suolo, Firenze, 12, 161-173.
- Chigira, M., & Yagi, H. (2006). Geological and geomorphological characteristics of landslides triggered by the 2004 Mid Niigata prefecture earthquake in Japan. Engineering Geology, 20.
- Chinowsky, P. S., Price, J. C., & Neumann, J. E. (2013). Assessment of climate change adaptation costs for the U.S. road network. Global Environmental Change, 23(4), 764-773. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2013.03.004>
- Cho, S. E. (2009). Infiltration analysis to evaluate the surficial stability of two-layered slopes considering rainfall characteristics. Engineering Geology, 105(1-2), 32-43. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.12.007>

- Clerici, A., Perego, S., Tellini, C., & Vescovi, P. (2006). A GIS-based automated procedure for landslide susceptibility mapping by the Conditional Analysis method: The Baganza valley case study (Italian Northern Apennines). *Environmental Geology*, 50(7), 941-961. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0264-7>
- Contador, D. S. R. (2019). Zonificación de amenazas por movimientos en masa a escala 1:25.000 para el municipio de Chinchiná, caldas [trabajo de investigación]. Universidad católica de Colombia.
- Corominas, J., & Moya, J. (1999). Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the Llobregat River basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*, 30(1-2), 79-93. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00046-X](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00046-X)
- Crozier, M. J. (2010). Deciphering the effect of climate change on landslide activity. *Geomorphology*, 124(3), 260-267. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.009>
- Cuesta, M. J., Sánchez, M. J., & García, A. R. (1999). Press archives as temporal records of landslides in the North of Spain: Relationships between rainfall and instability slope events. 30(2), 125-132.
- Dahal, R. K., Hasegawa, S., Nonomura, A., Yamanaka, M., Dhakal, S., & Paudyal, P. (2008). Predictive modelling of rainfall-induced landslide hazard in the Lesser Himalaya of Nepal based on weights-of-evidence. *Geomorphology*, 102(3-4), 496-510. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.05.041>
- De Graff, J. V., Romesburg, H. C., Ahmad, R., & McCalpin, J. P. (2012). Producing landslide-susceptibility maps for regional planning in data-scarce regions. *Natural Hazards*, 64(1), 729-749. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0267-5>

- Departamento Nacional de Planeación, Republica de Colombia. (2016). CONPES 3857 lineamientos de la politica para la gestion de la red terciaria.
- DGRDS. (2019). Metodología del Conocimiento de Riesgo para Diferentes Escenarios Amenazantes en Santander. Dirección de Gestión del Riesgo Santander.
- Díaz de Terán, J., Cendero, A., Araña, V., & Badiola, E. (1997). Geomorphological hazards of Europe (Elsevier, pp. 429-456). Clifford Embleton.
- Echeverri, O., & Valencia, Y. (2004). Análisis de los deslizamientos en la cuenca de la quebrada la Iguana de la ciudad de Medellín a partir de la integración lluvia _pendiente_ formación geológica. DYNA, 71(142), 33-45. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49614204>
- Ficklin, D. L., & Barnhart, B. L. (2014). Extracción de datos GCM descentralizados en formato SWAT. <https://pages.iu.edu/~dficklin/netcdf-to-swat-climate-input-files.html>
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. Nat. Hazards Earth Syst. Sci, 18, 2161-2181. <https://nhess.copernicus.org/articles/18/2161/2018/>
- Gabet, E. J., Burbank, D. W., Putkonen, J. K., Pratt-Sitaula, B. A., & Ojha, T. (2004). Rainfall thresholds for landsliding in the Himalayas of Nepal. Geomorphology, 63(3-4), 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.03.011>
- Gamboa, M. E. P. (2014). Reconstrucción y análisis de ocurrencias regionales de múltiples eventos de movimientos en masa generados por lluvias históricas en los Pirineos [Doctorado, Univesitat Politècnica de catalunya]. <http://hdl.handle.net/2117/95519>
- Glade, T. (1998). Establish the frequency and magnitude of storm events that cause landslides in New Zealand. Victoria University of Wellington.

- Glade, T. (2003). Landslide occurrence as a response to land use change: A review of evidence from New Zealand. *CATENA*, 51(4), 297-314. [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(02\)00170-4](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(02)00170-4)
- Godt, J. W., Baum, R. L., & Chleborad, A. F. (2006). Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(1), 97-110. <https://doi.org/10.1002/esp.1237>
- Gómez, C. M. (2008). Análisis del Efecto de la cohesión aparente en la capacidad Soportante de cimentaciones superficiales. [trabajo de investigación]. Instituto tecnológico de costa rica.
- Guidicini, G., & Iwasa, O. (1977). Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment. 16(1), 13-20. <https://doi.org/10.1007/BF02591434>
- Guzmán, J. (2016, mayo 26). Vías terciarias son una solución para el agro. <https://www.larepublica.co/infraestructura/vias-terciarias-son-una-solucion-para-el-agro-2383301#:~:text=De%20acuerdo%20con%20diferentes%20expertos,hasta%20las%20mi smas%20v%C3%ADas%20de%20tercer%20orden>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98(3), 239-267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., & Stark, C. P. (2008). The rainfall intensity–duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Deslizamientos de tierra*, 5, 15.
- Henríquez, L. (2019, noviembre 27). De todas las vías terciarias con las que cuenta Colombia, el 94% está en mal estado. Senado de la República de Colombia. <https://www.senado.gov.co/index.php/prensa/lista-de-noticias/546-de-todas-las-vias-terciarias-con-las-que-cuenta-colombia-el-94-esta-en-mal-estado>

- Huang, L., & Xiang, L. (2018). Method for Meteorological Early Warning of Precipitation-Induced Landslides Based on Deep Neural Network. *Neural Processing Letters*, 48(2), 1243-1260. <https://doi.org/10.1007/s11063-017-9778-0>
- IDEAM. (2021). Consulta y Descarga de Datos Hidrometeorológicos [Portal de Datos]. <http://dhime.ideam.gov.co/atencionciudadano/>
- IDEAM, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), & Corporación Autónoma Regional del Río Grande de la Magdalena. (2008). Mapa de cobertura de la tierra Cuenca Magdalena - Cauca: Metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia escala 1:100.000. Imprenta Nacional de Colombia.
- Jarboui, S. (2013, octubre 13). Public Road Transport Efficiency. 13 de octubre de 2013, 13(5), 64-71.
- Jiménez, C. A. (2017). Análisis de metodologías para la inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes [Maestría]. Universidad Nacional de Colombia.
- Khanal, N., & Watanabe, T. (2005). Landslide and debris flow hazards induced by heavy precipitation in Nepal. 111-118.
- Kim, J., Jeong, S., Park, S., & Sharma, J. (2004). Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils. *Engineering Geology*, 75(3-4), 251-262. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.06.017>
- Larsen, I. J., Montgomery, D. R., & Korup, O. (2010). Landslide erosion controlled by hillslope material. *Nature Geoscience*, 3(4), 247-251. <https://doi.org/10.1038/ngeo776>
- Lee, L. M., Gofar, N., & Rahardjo, H. (2009). A simple model for preliminary evaluation of rainfall-induced slope instability. *Engineering Geology*, 108(3-4), 272-285. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.06.011>

- Lee, M. L., Ng, K. Y., Huang, Y. F., & Li, W. C. (2014). Rainfall-induced landslides in Hulu Kelang area, Malaysia. *Natural Hazards*, 70(1), 353-375. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0814-8>
- Leiva, O. (2012). Memoria explicativa del mapa de amenazas por movimientos en masa, plancha 120 Bucaramanga, Santander. Subdirección de amenazas geológicas y entorno ambiental.
- Lim, T. T., Rahardjo, H., Chang, M. F., & Fredlund, D. G. (1996). Effect of rainfall on matric suctions in a residual soil slope. *Can. Geotech. J.*, 33, 10. [cdnsiencepub.com](https://doi.org/10.1139/cgj-33-1-10)
- Londoño, J. P. (2007). Evaluación holística de riesgos frente a movimientos en masa en áreas urbanas andinas. Una propuesta metodológica. 20, 20.
- Londoño, L. J. P. (2017). Cálculo de susceptibilidad a deslizamientos mediante análisis discriminante. Aplicación a escala regional. *DYNA*, 84(201), 278. <https://doi.org/10.15446/dyna.v84n201.61385>
- Love, G., Soares, A., & Püempel, H. (2010). Climate Change, Climate Variability and Transportation. *Procedia Environmental Sciences*, 1, 130-145. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2010.09.010>
- Low, T. H. (2012). An Investigation on One of the Rainfall-Induced Landslides in Malaysia. 17, 15.
- Mayorga, R. M. (2003). Determinación de umbrales de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. 7, 157-168.
- Mejía, C. A. R., Castelblanco, D. E. B., Acevedo, A. C., & Henao, D. M. S. (2019). Evaluación del riesgo por movimientos de remoción en masa activados por procesos de precipitación, estudio de caso vía Chagualá - quindío. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, 31(1), 7-14. <https://doi.org/10.33975/riuuq.vol31n1.239>

- Meyer, L., & Pachauri, R. (2014). Technical Support Unit for the Synthesis Report. 2014, 5, 169.
- Ministerio de Transporte. (2020). Transporte en Cifras- Estadísticas 2019. <https://plc.mintransporte.gov.co/Estad%C3%ADsticas/Transporte-en-Cifras>
- Mora, S., & Vahrson, W.-G. (1991). Determinacion_A_Priori_Amenaza_Deslizamientos_Utlizando_Indicadores_Morfodinamicos_Marzo-1992.pdf. 23, 259-273. <https://www.researchgate.net/publication/283730363>
- Moreno, H. A., Vélez, M. V., Montoya, J. D., & Rhenals, R. L. (2006). La lluvia y los deslizamientos de tierra en Antioquia: Análisis de su ocurrencia en las escalas interanual, intraanual y diaria. EIA, 5, 59-69. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000100005
- NASA. (2013). Measuring Precipitation: On the Ground and from Space [Académica]. World Bank Group. <https://olc.worldbank.org/sites/default/files/sco/E7B1C4DE-C187-5EDB-3EF2-897802DEA3BF/Nasa/chapter2.html>
- Ng, C. W. W., & Shi, Q. (1998). Influence of rainfall intensity and duration on slope stability in unsaturated soils. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 31(2), 105-113. <https://doi.org/10.1144/GSL.QJEG.1998.031.P2.04>
- ONTHEROAD. (2019). El cambio climático llegará a las carreteras y afectará a la seguridad vial. <https://www.ontheroadtrends.com/cambio-climatico-llegara-las-carreteras-afectara-la-seguridad-vial/>
- Paz, C., & Torres, A. (1989). Precipitación y su influencia sobre algunos deslizamientos ocurridos en las laderas del valle de Aburrá. [Trabajo de investigación]. Universidad Nacional de Colombia.

- Pérez-Valbuena, G. J. (2005). La infraestructura del transporte vial y la movilización de carga en Colombia. Banco de la República. <https://doi.org/10.32468/dtseru.64>
- Persichillo, M. G., Bordoni, M., & Meisina, C. (2017). The role of land use changes in the distribution of shallow landslides. *Science of The Total Environment*, 574, 924-937. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.125>
- Pisano, L., Zumpano, V., Malek, Ž., Roskopf, C. M., & Parise, M. (2017). Variations in the susceptibility to landslides, as a consequence of land cover changes: A look to the past, and another towards the future. *Science of The Total Environment*, 601-602, 1147-1159. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.231>
- Pizarro, R., Flores, J. P., Sangüesa, C., & Martínez, E. (2003). Módulo 2: Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia. Sociedad estándares de ingeniería para aguas y suelos Ltda, 2, 1-8. http://ctha.utalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/b_modulo_IDF.pdf
- PMA:GCA. (2007). Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional.
- Ponziani, F., Pandolfo, C., Stelluti, M., Berni, N., Brocca, L., & Moramarco, T. (2012). Assessment of rainfall thresholds and soil moisture modeling for operational hydrogeological risk prevention in the Umbria region (central Italy). *Landslides*, 9(2), 229-237. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0287-3>
- Poveda, R. S. P., Rodríguez, O. I. R., & Rosas, M. S. C. (2019). Análisis comparativo de los métodos utilizados para el cálculo del factor de seguridad del talud ubicado en el sector portal de la martinica de la ciudad de Ibagué [Seminario, Universidad Cooperativa de Colombia].

https://repository.ucc.edu.co/bitstream/20.500.12494/33518/1/2020_M%C3%A9todos_Utilizados_C%C3%A1lculo.pdf

Pradel, D., & Raad, G. (1993). Effect of Permeability on Surficial Stability of Homogeneous Slopes. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(2), 315-332.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:2\(315\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:2(315))

Pradenas, M. A. (2014). Umbral empírico de deslizamiento por precipitación, para la Provincia de Concepción [Memoria, Trabajo de Grado, Universidad del Bio-Bio].
<http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/810>

Promper, C., Puissant, A., Malet, J.-P., & Glade, T. (2014). Analysis of land cover changes in the past and the future as contribution to landslide risk scenarios. *Applied Geography*, 53, 11-19. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.05.020>

Ramírez, J. M., & Aristizábal, E. V. (2017). Metodología para la zonificación de la susceptibilidad por movimientos en masa en proyectos lineales. Estudio de caso en el acueducto del municipio de Fredonia, Antioquia. *Ingeniería y Ciencia*, 13(26), 173-206.
<https://doi.org/10.17230/ingciencia.13.26.7>

Ramos, A. M. R., Trujillo Vela, M. G., & Prada Sarmiento, L. F. (2015). Niveles umbrales de lluvia que generan deslizamientos: Una revisión crítica. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(2), 61. <https://doi.org/10.18359/rcin.1432>

Ray, R. L., & Jacobs, J. M. (2007). Relationships among remotely sensed soil moisture, precipitation and landslide events. *Natural Hazards*, 43(2), 211-222.
<https://doi.org/10.1007/s11069-006-9095-9>

Rezaei, S., Shooshpasha, I., & Rezaei, H. (2018). Empirical Correlation between Geotechnical and Geophysical Parameters in a Landslide Zone (Case Study: Nargeschal Landslide).

Earth Sciences Research Journal, 22(3), 195-204.
<https://doi.org/10.15446/esrj.v22n3.69491>

Saito, H., Nakayama, D., & Matsuyama, H. (2010). Relationship between the initiation of a shallow landslide and rainfall intensity—Duration thresholds in Japan. *Geomorphology*, 118(1-2), 167-175. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.12.016>

Salazar, L. F. (2011). Determinación de la humedad del suelo para el inicio de movimientos en masa en la región cafetera colombiana con el uso de modelos físicos experimentales [Magister]. Universidad Nacional de Colombia.

SGC. (2016). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 100000. Servicio Geológico Colombiano.

SGC. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/9789585978225>

SGC, Ministerio de Minas y Energía, & Universidad Nacional de Colombia. (2015). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa: Escala detallada.

Sierra, A. C., & Durán, L. A. (2019). Guía metodológica para recolección de datos, evaluación, monitoreo, seguimiento e informe de gestión del riesgo en la remoción de masas [Pregrado, Universidad de la Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/536

SIMMA. (2021). Sistema de Información de Movimientos en Masa. SIMMA. <http://simma.sgc.gov.co/>

Stern, P., & Easterling, W. (1999). Making Climate Forecasts Matter (p. 6370). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/6370>

- Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales (Ingeniería de Suelos Ltda., Vol. 1). Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- Suárez, J. (2009). Efecto del agua. En Deslizamientos—Análisis Geotécnico (1.^a ed., Vol. 1, p. 588). Universidad Industrial de Santander UIS. <https://www.erosion.com.co/deslizamientos-tomo-i-analisis-geotecnico/>
- UC Santa Barbara. (2021). CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations. Climate Hazards Center. <https://chc.ucsb.edu/data/chirps>
- UIS-AMB. (2019). Convenio para aunar esfuerzos entre el Área Metropolitana de Bucaramanga y la Universidad Industrial de Santander para la asesoría técnica, normativa y ambiental para la definición y ubicación de un único sitio para la construcción del relleno sanitario regional. Convenio interadministrativo No. 000132 , Universidad Industrial de Santander.
- University Corporation for Atmospheric Research. (2020). The Climate Data Guide: Precipitation Data Sets: Overview & Comparison table [Académica]. National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/precipitation-data-sets-overview-comparison-table>.
- Uzielli, M., Rianna, G., Ciervo, F., Mercogliano, P., & Eidsvig, U. K. (2018). Temporal evolution of flow-like landslide hazard for a road infrastructure in the municipality of Nocera Inferiore (southern Italy) under the effect of climate change. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(11), 3019-3035. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-3019-2018>
- Van Westen, C. J. (2010). GIS for the assessment of risk from geomorphological hazards. En *Geomorphological Hazards and Disaster Prevention* (pp. 205-220). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807527.017>

Van Zuidam, R. (1986). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. Smits Publishers.

Zhang, S. (2010). Existence results of positive solutions to fractional differential equation with integral boundary conditions. *Mathematica Bohemica*, 135(3), 299-317.
<https://doi.org/10.21136/MB.2010.140706>

Zhang, Y. (2020). Research on the relationship between precipitation and landslide. *E3S Web of Conferences*, 198, 1-4. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202019804027>

Zhou, W., & Tang, C. (2014). Rainfall thresholds for debris flow initiation in the Wenchuan earthquake-stricken area, southwestern China. *Landslides*, 11(5), 877-887.
<https://doi.org/10.1007/s10346-013-0421-5>

Apéndices

Apéndice A. Puntajes asignados en la priorización de la inversión en vías terciarias

Criterios			Parámetros	Puntaje
Espacial	Conectividad	Vereda o vía terciaria	Centro poblado	30
			Centro de acopio punto de intercambio modal	25
			Otra vereda o vía terciaria	20
			Vía nacional	20
			Secundaria	15
			Otros	10
	Acceso	Estado de las vías de acceso a la vía terciaria en análisis	Bueno	10
			Regular	8
			Malo	5
Económica	Infraestructura y logística rural	Áreas sembradas (cultivos lícitos)	Más de 20 ha a máximo 15 min de la vía	5
			Entre 3 y 20 ha a máximo 15 min de la vía	3
			Menos de 3 ha a máximo 15 min de la vía	2
	Cadenas productivas	Conexión productos que son bienes finales o insumos de otros bienes finales priorizados en el marco de la política de desarrollo productivo	Priorizados en el marco de la política de desarrollo productivo	5
			Priorizados por ministerio de comercio, industria y turismo	5
			como vías de acceso turístico	
			Priorizados por ministerio de minas y energía como cías de desarrollo minero	5
			No priorizados en el marco de la política de desarrollo productivo	0
		Áreas de agricultura familiar (Colombia siembra)	Priorizadas por el ministerio de agricultura y desarrollo rural	5
			No priorizadas por el ministerio de agricultura y desarrollo rural	0
Social	Población	Concentrada	Más de 5 viviendas / km	10
		Dispersa	Menos de 5 viviendas / km	6
	Acceso dotacional	Conexión centros poblados o culturales		10
	Sustitución cultivos	Promueve la sustitución de cultivos		15

Nota: adaptado de COMPES 3857 (Departamento Nacional de Planeación, Republica de Colombia, 2016)

Apéndice B. *Ejemplos de nomenclatura de unidades geológicas de superficie*

Abreviatura	Nombre UGS	Abreviatura	Nombre UGS
Sa	Suelo antrópico	Stcba	Suelo transportado de ceniza y bloque altamente meteorizado
Sale	Suelo antrópico de llenos de escombros	Stct	Suelo transportado de cono de talus
Sra	Suelo residual de arenisca	Stta	Suelo transportado de terraza alta
Srl	Suelo residual de lutita	Sttm	Suelo transportado de terraza media
Sta	Suelo transportado aluvial	Sttb	Suelo transportado de terraza alta
Stca	Suelo transportado coluvial antiguo	Stf	Suelo transportado fluviotorrencial
Stco	Suelo transportado coluvial	Stfl	Suelo transportado de flujo de lodo
Stcbm	Suelo transportado de ceniza y bloque moderadamente meteorizado	Stfv	Suelo transportado fluviovolcánico
Rmda	Roca muy dura de arenisca	Rdi	Roca dura de ignimbrita
Ria	Roca intermedia de arenisca	Rbari	Roca blanda arenosa de ignimbrita
Rbl	Roca blanda de lutita	Rbai	Roca blanda arcillosa de ignimbrita
Rmbl	Roca muy blanda de lutita	Rbe	Roca blanda de esquisto

Nota: adaptado de (SGC et al., 2015)

Apéndice C. Ejemplos de unidades geomorfológicas.

Origen denudacional

Acrónimo	Unidad	Acrónimo	Unidad
Da	Altiplano	Dlcad	Lóbulo y cono de avalancha de detritos
Dcrem	Cerro remanente o relicto	Dlcar	Lóbulo y cono de avalancha de rocas
DAcrem	Cerro remanente o relicto de altiplano	Dld	Loma denudada
Dcrs	Cerro residual	Dlor	Loma residual
DACrs	Cerro residual de altiplano	DAlor	Loma residual de altiplano
Dc	Cima	Dldi	Lomeríos disectados
Dcre	Colina remanente	DAlldi	Lomeríos disectados de altiplano
DAcre	Colina remanente de altiplano	Dlmd	Lomeríos muy disectados
Dcred	Colina remanente disectada	Dlpd	Lomeríos poco disectados
Dcr	Colina residual	Dlde	Lomo denudado
DACr	Colina residual de altiplano	Dldeac	Lomo denudado alto de longitud larga
Dcrd	Colina residual disectada	Dldeal	Lomo denudado alto de longitud media
Dct	Cono de talus	Dldebl	Lomo denudado bajo de longitud media
Dfe	Cono flujos de detritos	Dldebm	Lomo denudado bajo de longitud corta
Dlfd	Cono o lóbulo de flujo de detritos	Dldemm	Lomo denudado moderado de
Dlfl	Cono o lóbulo de flujo de lodo	Dlres	Lomo residual
Dft	Cono o lóbulo de flujo indiferenciado	DAlres	Lomo residual de altiplano
Dco	Cono y lóbulo coluvial y de soliflucción	Dlcad	Lóbulo y cono de avalancha de detritos
Deem	Escarpe de erosión mayor	Dpf	Pedimentos
DAeem	Escarpe de erosión mayor de altiplano	DAmo	Montículo y ondulaciones denudacionales
Deeme	Escarpe de erosión menor	Dpa	Pedimentos de acumulación
Def	Escarpe faceteado	Dpe	Pedimentos de erosión
Dg	Glacis	Dpn	Penillanura o peneplanicie
Dga	Glacis de acumulación	Dp	Planicie
Dge	Glacis de erosión	Dpcd	Planicie colinada denudada
Di	Inselberg	Dpcr	Planicie colinada residual
Dle	Ladera erosiva	Dpad	Planos aterrazados o duricostras
Dlo	Ladera ondulada	Dsd	Sierra denudada
Dmab	Mesa de Abanico	Dsr	Sierra residual aplanamiento

Dlcar	Lóbulo y cono de avalancha de rocas	Dsa	Superficie de erosión o o silicretas
Dld	Loma denudada	Dtcs	Terrazas o mesas calcretas
Dlor	Loma residual	Dts	Terrazas sobreelevadas “colgadas
DAlor	Loma residual de altiplano	Dldi	Lomeríos disectados

Origen Fluvial

Acrónimo	Unidad	Acrónimo	Unidad
Faa	Abanico fluviotorrencial	Ftee	Escarpe de terraza de erosion
Fa	Albardones o dique natural	Flm	Lago en media luna.
Fbp	Barra puntual	Flg	Laguna
Fbl	Barra longitudinal	Fma	Meandro abandonado
Fbc	Barra compuesta	Fpac	Planicie aluvial confinada
Fca	Cauce aluvial	Fpla	Planicie y delta lacustrino
Fcdy	Cono de deyección	Fpi	Plano o llanura de inundacion
Fcd	Cuenca de decantacion (Basines)	Fpa	Plano anegadizo
Fdd	Delta de desborde natural	Fpl	Plano y artesa lagunar
Fdl	Delta lacustrino	Fta	Terraza de acumulacion
Fea	Escarpe de abanico fluvial	Ftas	Terraza de acumulaci3n subreciente
Ftae	Escarpe de terraza de acumulacion	Fte	Terraza de erosión

Origen antropogénico

Acrónimo	Unidad	Acrónimo	Unidad
Aca	Canal Artificial	Ap	Presa
Ac	Canteras	Arb	Rellenos de basuras
Aemb	Embalses	Are	Rellenos de escombros
Ase	Excavaciones	Asp	Superficies de explanaci3n
Aemc	Explotaci3n minera	Ata	Terrazas agrícolas

Origen Estructural

Acrónimo	Unidad	Acrónimo	Unidad
Sbh	Espol3n festoneado moderado de longitud larga	Sefesml	Barras homoclinal
Sce	Espol3n festoneado alto de longitud corta	Sefesac	Cerro estructural
Sces	Espol3n festoneado alto de longitud media	Sefesam	Colina estructural
Scor	Espol3n festoneado alto de longitud larga	Sefesal	Cornisa estructural
Sclc	Ladera de contrapendiente de cuesta	Sft	Faceta triangular
Ssslc	Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	Sgf	Gancho de flexi3n

Ssale	Ladera estructural de sierra anticlinal	Slcp	Ladera contrapendiente
Sift	Lomo de falla con faceta triangular	Sct	Cuenca de tracción
Selc	Ladera de contrapendiente de espinazo	Sme	Escarpe de meseta
Ssalc	Ladera de contrapendiente de sierra anticlinal	Se	Espinazo
Sshlc	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	Ses	Espolón
Sesbc	Espolón bajo de longitud corta	Sc	Cuesta
Sesbm	Espolón bajo de longitud media	Sles	Ladera escalonada
Sesbl	Espolón bajo de longitud larga	Sle	Ladera estructural
Sesmc	Espolón moderado de longitud corta	Scle	Ladera estructural de cuesta
Sesmm	Espolón moderado de longitud media	Sele	Ladera estructural de espinazo
Sesml	Espolón moderado de longitud larga	Sdd	Domo diapirico
Sesac	Espolón alto de longitud corta	Sefc	Espolón faceteado
Sesam	Espolón alto de longitud media	Sefes	Espolón festoneado
Sesal	Espolón alto de longitud larga	Ssp	Laguna de falla
Sshle	Ladera estructural de sierra homoclinal	Sloe	Lomeríos estructurales
Sefcbc	Espolón faceteado bajo de longitud corta	Slf	Lomo de falla
Sefcbm	Espolón faceteado bajo de longitud media	Slfe	Escarpe de línea de falla
Sefcbl	Espolón faceteado bajo de longitud larga	Slo	Lomo de obturación
Sefcmc	Espolón faceteado moderado de longitud corta	Sm	Meseta estructural
Sefcmm	Espolón faceteado moderado de longitud media	Sp	Plancha
Sefcml	Espolón faceteado moderado de longitud larga	Svc	Plano aluvial confinado
Sefcac	Espolón faceteado alto de longitud corta	Ss	Sierra
Sefcam	Espolón faceteado alto de longitud media	Ssan	Sierra anticlinal
Sefcal	Espolón faceteado alto de longitud larga	Ssbe	Sierra de barras estructurales
Sssle	Ladera estructural de sierra sinclinal	Ssh	Sierra homoclinal
Sefesbc	Espolón festoneado bajo de longitud corta	Sss	Sierra sinclinal
Sefesbm	Espolón festoneado bajo de longitud media	Sslp	Sierra y lomo de presión
Sefesbl	Espolón festoneado bajo de longitud larga	Smle	Superficie tabular de meseta
Sefesmc	Espolón festoneado moderado de longitud corta	Sbf	Terraza o berma de fallamiento
Sefesmm	Espolón festoneado moderado de longitud media	Svl	Volcan de lodo

Nota: adaptado de (SGC et al., 2015)

Apéndice D. Clasificación Corine Land Cover para Colombia.

Territorios artificializados

1.1 Zonas urbanizadas	1.1.1 Tejido urbano continuo	Casas con jardín Red vial (calles y carreras) Áreas verdes <5 ha
	1.1.2 Tejido urbano discontinuo	Áreas deportivas Parques y áreas urbanas < 5 ha Cementerios Escuelas, hospitales Parqueaderos
1.2 Zonas industriales, comerciales y redes de comunicación	1.2.1 Zonas industriales y comerciales	Bomberos, cárceles, estaciones de policía, batallones Centros comerciales Edificios industriales y bodegas Emisoras y canales
	1.2.2 Red vial, ferroviarias y terrenos asociados	Red vial nacional Estaciones de gasolina Terminales
	1.2.3 Zonas portuarias	Puertos
	1.2.4 Aeropuertos	Aeropuertos y helipuertos
	1.2.5 obras hidráulicas	Plantas de tratamientos Acueductos Presas
1.3 Zonas mineras y escombreras	1.3.1 zonas mineras	Areneras, canteras Fábricas de cemento Explotación petrolera, carbón, oro, etc.
	1.3.2 Escombreras y vertederos	Vertederos públicos Vertederos industriales
1.4 Zonas verdes artificializadas	1.4.1 Zonas verdes urbanas	Jardines ornamentales Parques botánicos Zoológicos
	1.4.2 Instalaciones recreativas	Campos de football Hostales Piscinas

Territorios Agrícolas

2.1 Cultivos anuales	2.1.1 Otros cultivos transitorios	Arroz, papa, fresa Tabaco Flores no confinadas Algodón
	2.1.1 Otros cultivos permanentes	Caña de azúcar

2.2 Cultivos permanentes		Banano y plátano Café Cacao Palma africana Frutales Hortalizas
	2.3.1 Pastos limpios	Poco matorrales Poco arboles
2.3 Pastos	2.3.2 Pastos arbolados	Arboles de altura de 5m Zonas pantanosas
	2.3.3 Pastos enmalezados	Maleza, rastrojos Pastos utilizados para ganadería Terrenos abandonados

Bosques y áreas seminaturales

3.1 Bosques	3.1.1 Bosque natural denso	Área boscosa mayor a 25 ha Guaduas Pocas rocas
	3.1.2 Bosque natural Fragmentado	Área de maleza menor al 25% Área de pastos menor al 30% Área de cultivos menor 20%
	3.1.3 Bosque ripario	Área de árboles mayor al 70%
	3.1.4 Bosque mangle	Ríos y ciénagas con área menor a 25 ha Vegetación acuática menor a 25 ha
	3.1.5 Bosque plantado	Plantaciones jóvenes mayor a 25 ha
3.2 Áreas con vegetación herbácea y arbustiva	3.2.1 Sabanas	Pantanos menor a 25 ha Herbácea natural mayor a 25 ha
	3.2.2 Arbustos y matorrales	Rastrojos bajos Cultivos abandonados de más de 3 años
	3.2.3 Vegetación espinosa	Cactus
	3.2.4 Vegetación de paramo	Gramíneas Frailejones
3.3 Áreas sin o poca vegetación	3.3.1 Playas, arenales y dunas	Campos de dunas Playas de ríos
	3.3.2 Afloramientos rocosos	Acantilados
	3.3.3 Tierras desnudas	Tierras salinizadas Semidesiertos
	3.3.4 Zonas quemadas	Incendios forestales

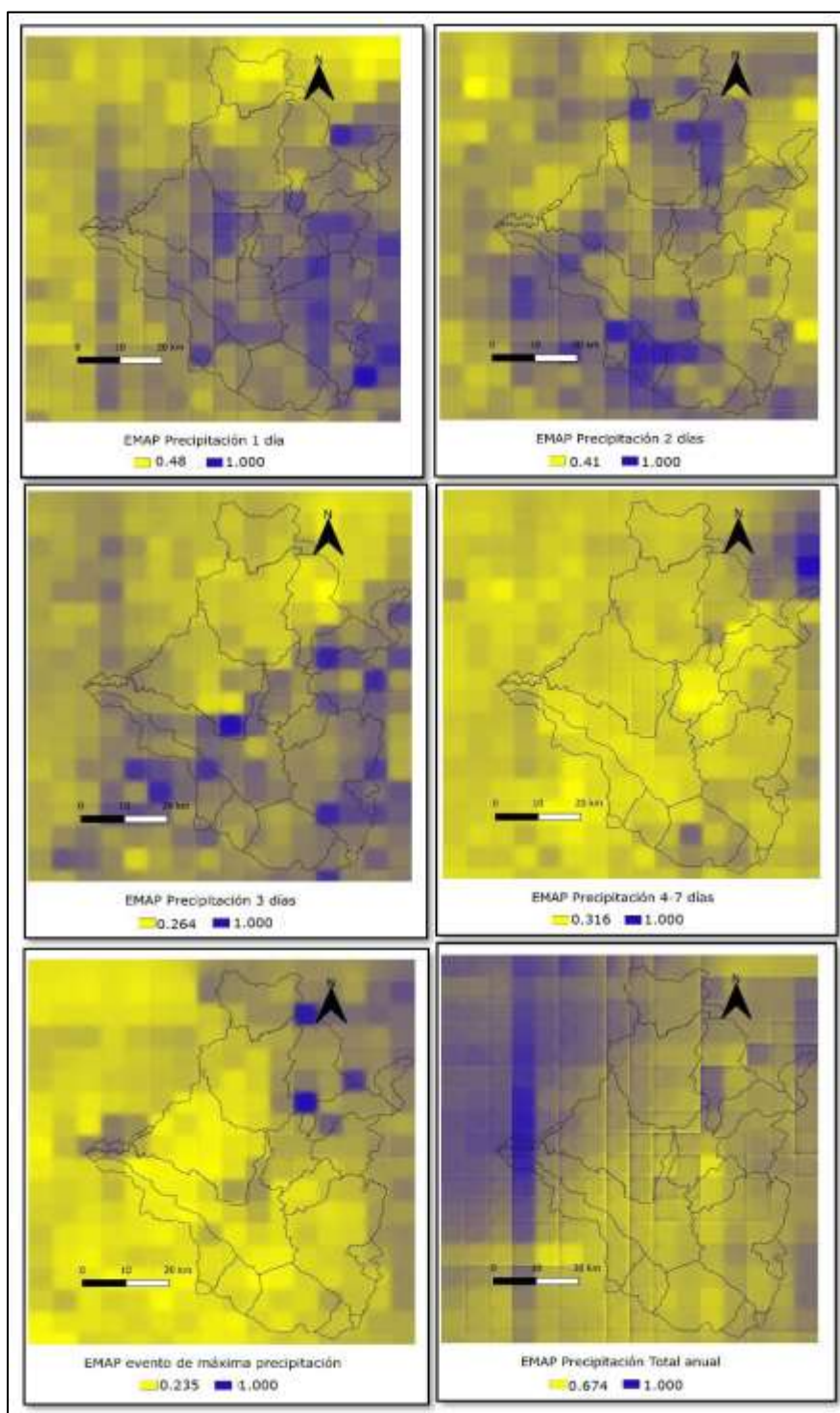
Nota: Adaptado de (IDEAM et al., 2008)

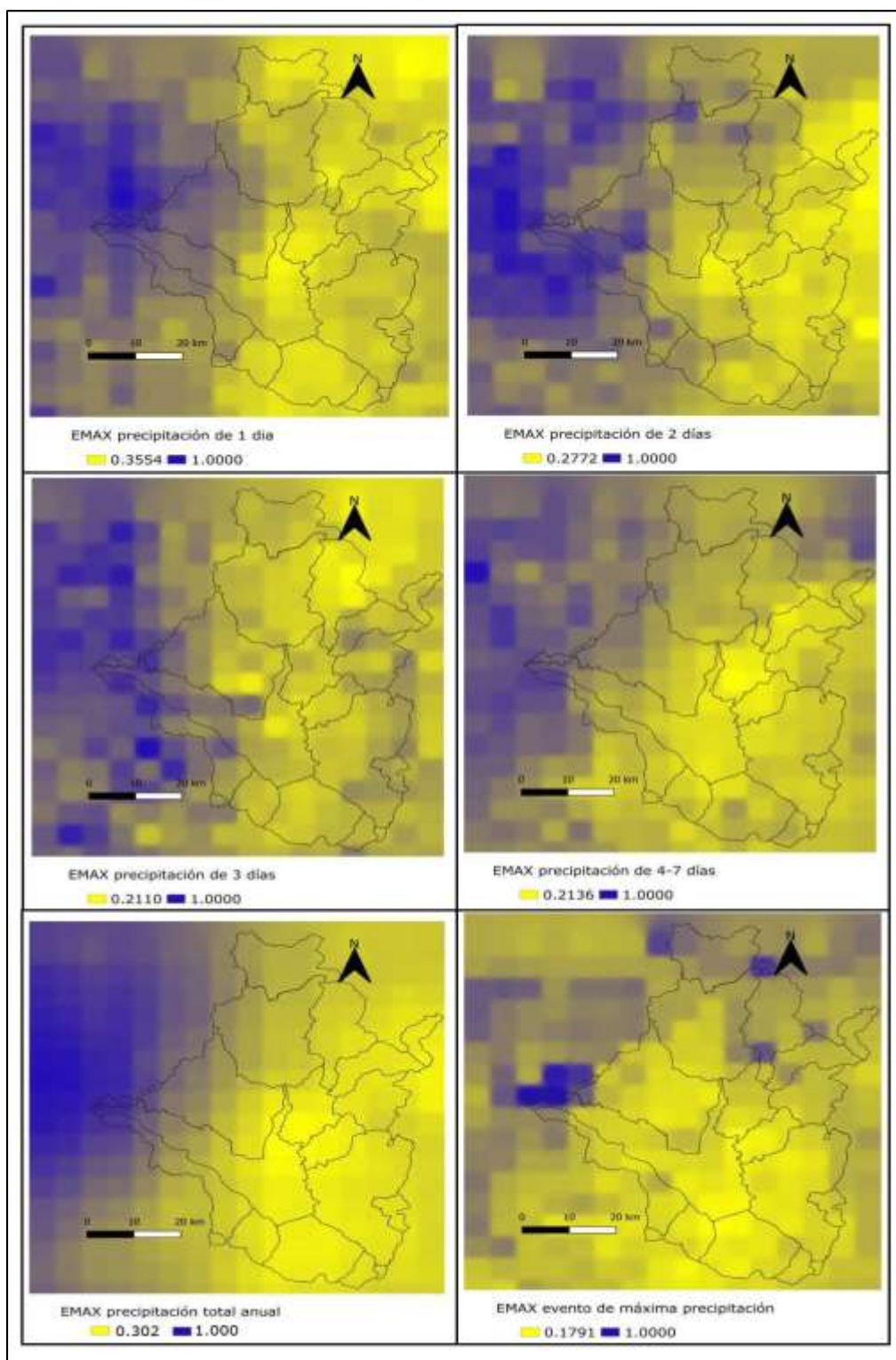
Apéndice E. Principales fuentes satelitales de datos sobre precipitación.

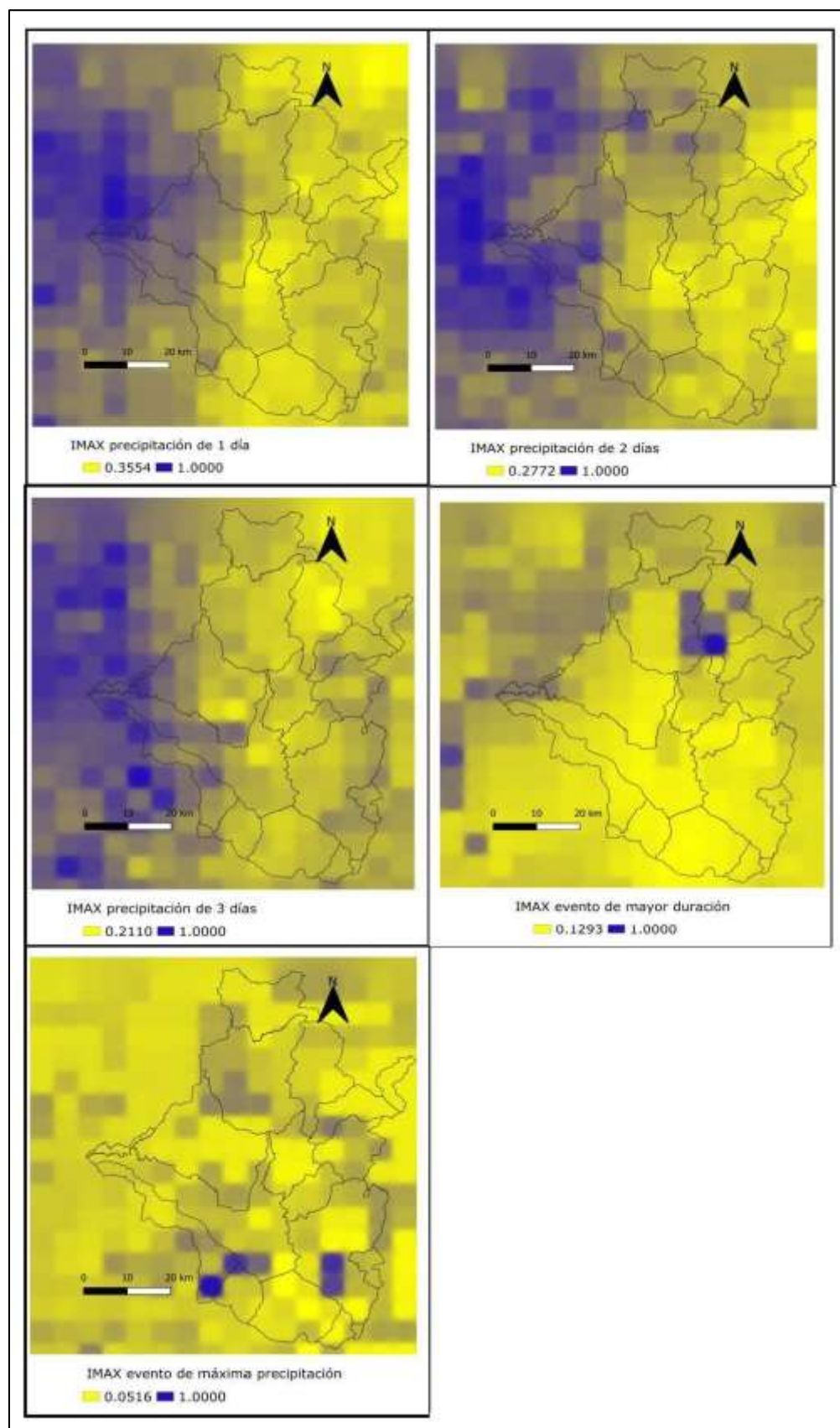
Plataforma	Descripción	Resolución espacial y temporal	Formato
Disco ges ¹	Es un centro de datos multisatelital de la dirección de misiones científicas (smd) de la nasa que proporciona información y servicios de ciencias de la tierra.	0,25° a 5 ° 30 min, 1 día, 1 mes	Visualización, geotif, hdf5, netcdf, opendap
Pps casi en tiempo real ²	Es un servidor de datos casi en tiempo real que contiene productos de baja latencia que procesa, analiza y archiva de las misiones gpm, trmm y satelites asociados.	0,25°, hasta 5° 30 min hasta 1 mes	Geotif, hdf 5
Api de editor de pmm ³	Es un editor de productos sig que proporcionar información derivada de dos fuentes primarias: el sistema mundial de monitoreo de deslizamientos de tierras/inundaciones y las recuperaciones integradas multi-satelite para el producto de precipitación de gpm.	10 km (0,1°) 30 minutos hasta 7 días	Visualización, geotif
Giovanni ⁴	Desarrollada por ges disc, esta proporciona una forma simple e intuitiva de visualizar, analizar y acceder a grandes cantidades de datos de teledetección de ciencias de la tierra sin tener que descargar los datos.	10 km (0,1°) 30 min hasta 24 horas	Visualización, geotif, kmz, netcdf
Portal de mapeo de desastres de la nasa ⁵	Es una poderosa interfaz en línea basada en arcgis para ver, analizar y descargar los últimos productos casi en tiempo real y conjunto de datos de respuesta a desastres. Su unidad primaria es la acumulación de precipitación en mm.	10 km (0,1°) 30 min hasta 7 días	Visualización, geotif
CHIRPS ⁶	Es un conjunto de datos de precipitación cuasi global que crea series de tiempo de lluvia en cuadrículas para análisis de tendencias y seguimiento de sequias estacionales.	0,05° x 0,05 °	Tif, bil, netcdf

Nota: adaptado de 1. <https://gpm.nasa.gov/data/sources/ges-disc> 2. <https://gpm.nasa.gov/data/sources/pps-nrt> 3. <https://gpm.nasa.gov/taxonomy/term/1394> 4. <https://gpm.nasa.gov/data/sources/giovanni> 5. <https://gpm.nasa.gov/taxonomy/term/1427> 6. <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>

Apéndice F. *Descriptores de precipitación (EMAP, EMAX e IMAX)*







Apéndice G. Amenazas calculadas con los distintos descriptores de precipitación

