

**ANÁLISIS DE LA ZONA DE REMOCIÓN DE MASA, SECTOR DE LA VEREDA
SERVITÁ, MUNICIPIO DE VILLAVICENCIO: ALCANCE DE LA AMENAZA Y
SOLUCIONES DE INGENIERÍA**



Por:

Carolina Pineda Herrera
Lina Fernanda Sabogal Ríos

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2019

**ANÁLISIS DE LA ZONA DE REMOCIÓN DE MASA, SECTOR DE LA VEREDA
SERVITÁ, MUNICIPIO DE VILLAVICENCIO: ALCANCE DE LA AMENAZA Y
SOLUCIONES DE INGENIERÍA**

Por:

**CAROLINA PINEDA HERRERA
LINA FERNANDA SABOGAL SÁNCHEZ**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de **Ingenieras Civiles**

Aprobado por:

ING. GERMAN ERNESTO CHICANGANA MONTÓN, MSC
Director

GEO. OSCAR ENRIQUE FORERO OSPINO, MG
Codirector

**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO**

2019

AUTORIDADES ACADÉMICAS

F. JUAN UBALDO LÓPEZ SALAMANCA, O.P.

Rector General

F. MAURICIO CORTEZ GALLEGU, O.P.

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ARTURO RESTREPO RESTREPO, O.P.

Rector Sede Villavicencio

P. FERNANDO CAJICÁ OSPINA, O.P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

JHON JAIRO GIL PELÁEZ

Decano Facultad de Ingeniería Civil

DEDICATORIA

A mi padre Alirio Pineda y a mi madre Claudia Herrera, que siempre han estado ahí; y a
Lizett

que le ha dado luz a mi vida.

-Carolina Pineda H

Por las palabras de aliento, reprimenda, guía y consuelo, dedico este trabajo Dilber A.
Sabogal R,
Marco T. Sabogal, R.Y, y Maximiliano García, . Por la verdad, el tiempo, la tenacidad, la
moral y los valores que forjan al hombre en el camino escarpado y peligroso que ha de
recorrer, deseando, no siempre la cima sino el recorrido, que
pertenezcan a dicho macizo y del cual agradeces conocer pero no deseas repetir.

-Fernanda Sabogal R

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director de tesis por habernos guiado y ayudado en este proceso, a mis padres por el apoyo brindado, a la vida por haberme permitido llegar hasta aquí, a Adriana que no me dejó rendirme nunca y a todos aquellos que creyeron en mí y me dieron fuerza cuando creí

que ya no

la tenía.

-Carolina Pineda H

Para quienes en su libertad decidieron quedarse, la gratitud con chocolates y flores no basta, sin embargo, en un cariñoso intento agradezco con todo el corazón a Blanca L. Sabogal, mi madre,

German E. Chicangana, director; Iván D. Acosta, por ser maestros de vida y profesión, por apretar y soltar la cuerda en los momentos justos, a mi hermana de chocolate Ximena Daza que me pone a raya y a todas aquellas personas que hicieron de mi vida y mi etapa de

formación tan

gratificante y divertida.

-Fernanda Sabogal R

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	14
1. INTRODUCCIÓN	14
1.1. Motivación y formulación del problema	14
1.2. Finalidad	16
1.2.1. Objetivo General.....	19
1.2.2. Objetivo Específicos.....	19
1.3. Aportes del Trabajo	19
Capítulo 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA	21
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1. GEOMORFOLOGÍA.....	21
2.1.1. Morfogénesis	21
2.1.1. Morfodinámica	21
2.1.2. Morfometría.....	22
2.2. MOVIMIENTOS EN MASA	22
2.2.1. Desprendimiento o caídas.....	22
2.2.2. Flujos	22
2.2.3. Deslizamientos	23
2.2.3.1. Deslizamientos lentos.....	23
2.2.3.2. Deslizamientos rápidos	24
2.2.3.3. Deslizamientos traslacionales.....	24
2.2.3.4. Deslizamientos rotacionales	24
2.2.4. Factores que controlan los deslizamientos	25
2.2.4.1. Factores internos	25
2.2.5. Factores externos	26
3. MARCO CONCEPTUAL.....	28
4. MARCO GEOGRÁFICO	29
5. MARCO NORMATIVO.....	32
6. ESTADO DEL ARTE.....	33
6.1. Conclusión del Capítulo.....	33
Capítulo 3. METODOLOGÍA.....	35

7.	METODOLOGÍA	35
7.1.	Recolección de información	35
7.2.	Elaboración del mapa de la zona afectada por el movimiento de remoción de masa. 35	
7.3.	Análisis hidrometereológico	35
7.4.	Análisis morfométrico	36
7.5.	Mapeo de las obras realizadas en los últimos años.....	36
7.6.	Análisis de resultados	37
7.7.	Zonificación de la amenaza	37
7.8.	Zonificación de la vulnerabilidad	37
7.9.	Zonificación del riesgo	37
7.10.	Propuestas de posibles soluciones en ingeniería	37
Capítulo 4.	RESULTADOS	38
8.	RESULTADOS.....	38
8.1.	Geología de la región de estudio.....	38
8.1.1.	Filitas y cuarcitas de Susumuco (complejo de Quetáme) ediacariano (NPESU)	40
8.1.2.	Formación Lutitas de Pipiral	42
8.1.3.	Formación Brechas de Buenavista: Jurásico Superior (Titoniano)	44
8.1.4.	Formación Lutitas de Macanal: Cretáceo Inferior (Berrasiano).....	44
8.1.5.	Terrazas y Coluviones: Cuaternario (Pleistoceno Superior)	45
8.1.6.	Falla Servitá.....	47
8.2.	Tipo de Suelo	48
8.2.1.	Entisoles	49
8.3.	Geomorfología	49
8.4.	Pendiente.....	50
8.5.	Climatología.....	52
9.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	54
9.1.	Cobertura Vegetal y uso del suelo	54
9.2.	Caracterización de la remoción en masa de la zona vereda Servita	55
9.3.	Climatología.....	58
9.3.1.	Precipitación anual	58
9.3.1.1.	Año 2012:	59

9.3.1.2.Año 2015:	60
9.3.1.3.Año 2017:	61
9.4. Soluciones de ingeniería	62
9.4.1. Métodos para disminuir o eliminar el riesgo	63
9.4.1.1.Prevenición	63
9.4.1.2.Elusión de la amenaza	63
9.4.2. Métodos de estructuras de control de movimiento	66
9.5. Pronóstico	70
Capítulo 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	71
10. CONCLUSIONES	71
11. TRABAJOS FUTUROS	72
12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
13. ANEXOS	75

TABLA DE FIGURAS

Figura 1. Fotografía del camino Bogotá-Villavicencio, aproximadamente 1870	15
Figura 2. Localización del sector del análisis en el Mapa geológico del municipio de Villavicencio. Modificado de Chicangana (2009).....	16
Figura 3. Fotografía aérea del estado de la zona afectada por la remoción de masa en la Vereda Servita el 23 de junio de 2017.....	18
Figura 4. Fotografía aérea del estado de la zona afectada por la remoción de masa en la Vereda Servita el 2 de noviembre de 2017.....	18
Figura 5. Deslizamiento. [9]	23
Figura 6. Deslizamiento traslacional. [8].....	24
Figura 7. Deslizamiento rotacional. [8]	25
Figura 8. Deslizamiento cosísmico resultante del sismo de 24 de mayo de 2008 en Quetame, Cundinamarca [11]	26
Figura 9. Ubicación de la vereda Servitá en el municipio de Villavicencio.....	29
Figura 10. Zona demarcada que corresponde al sector de estudio.	30
Figura 11. Área de la zona de análisis con el trazo de la vía en la vereda Servitá con el trazo que indica la Falla de Servitá en esta región.	30
Figura 12. Índices geomórficos empleados en esta investigación para la caracterización de geomorfología tectónica. A: Asimetría de cuencas. B: Índice de la relación entre la longitud de los drenajes y la pendiente topográfica por donde discurren estos. Modificado de [19] en [11]).....	36
Figura 13. Corte geológico que muestra de manera idealizada las unidades de roca que se presentan en la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia. (Las rocas del Complejo Quetame no alcanzan a observarse en esta figura).....	39
Figura 14. Aspecto de la Quebrada Susumuco, con Cuarcitas en sus orillas, relacionadas a las Cuarcitas y Filitas de Guayabetal, en límites de los departamentos de Cundinamarca y Meta.	41
Figura 15. Afloramiento de las cuarcitas pertenecientes a las Cuarcitas y Filitas de Susumuco en la margen izquierda de la Quebrada Susumuco, en límites de los departamentos de Cundinamarca y Meta. Esta unidad de roca pertenece al Complejo Quetame.....	42
Figura 16. Afloramiento de la Formación Lutitas de Pipiral en el sector correspondiente al nacimiento la Quebrada La Esmeralda, Vereda de Servitá. En este sector al pie del	

<i>afloramiento, no observable en la foto, se encuentra el contacto fallado con la Formación.</i>	43
Figura 17. Aspecto de las limolitas con espesores de 3 m de la Formación Lutitas de Macanal que afloran en la margen derecha de la Quebrada La Esmeralda. Fuente:.....	44
Figura 18. Aspecto de las limolitas (lutitas) con laminación de espesor 5 mm de la Formación Lutitas de Macanal que afloran en la margen derecha de la Quebrada La Esmeralda. Los bloques de diverso tamaño y las arenas forman parte de los sedimentos de la quebrada.....	45
Figura 19. Panorámica del sector de La Reforma, en el occidente de Villavicencio Fuente: Elaboración propia. En primer plano se observan las terrazas Pleistocénicas derivadas de la evolución de la cuenca del río Negro – Guayuriba en un contexto local. Al fondo se observa el cerro de Buenavista. Las flechas indican por donde se presenta la Falla Servitá que coincide con el curso de la Quebrada Servitá.....	46
Figura 20. Mapa geológico de la zona de estudio.	47
Figura 21. Tipo de suelo de la zona estudiada. Anexo 2	49
Figura 22. Geomorfología de la zona estudiada, Servitá. Anexo 3	50
Figura 23. Mapa de pendientes de la zona estudiada, Servitá.	52
Figura 24. Precipitaciones en Colombia.	53
Figura 25. Cobertura vegetal y uso del suelo en la zona estudiada, vereda Servitá..	55
Figura 26. Clasificación de la remoción en masa en la zona de estudio, Servitá. Anexo 6 ...	57
Figura 27. Precipitación total anual 2010-2017.....	58
Figura 28. Imagen satelital de la zona estudiada en el 2005.	59
Figura 29. Imagen satelital de la zona estudiada en el 2012.....	59
Figura 30. Valores de precipitación en el año 2012.	60
Figura 31. Valores de precipitación del año 2015.	61
Figura 32. Valores de precipitación en el año 2017.	62
Figura 33. Opción 1 - Viaducto.	64
Figura 34. Opción 2 - Viaducto paralelo a la falla.	65
Figura 35. Daños causados por el deslizamiento del 22 de Junio de 2017 en Servitá.....	66
Figura 36. Steel slit dam.	67
Figura 37. Tentativa de lugares en donde colocar el Steel slit dam.	68
Figura 38. Zona afectada por deslizamiento en vía antigua Bogotá - Villavicencio.	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Marco normativo..	32
Tabla 3. Clasificación de pendientes. [12].....	51
Tabla 4. Áreas de pendientes del área estudiada.	51

RESUMEN

Villavicencio, capital del departamento del Meta, más conocido como La Puerta al Llano, está ubicada en el piedemonte de la cordillera oriental colombiana. En esta cordillera se sitúa la vía al llano, que comunica a Villavicencio con la capital del país, convirtiendo a esta vía en una de las más importantes a nivel nacional.

Servitá es una vereda del municipio de Villavicencio que, gracias a su ubicación en la cordillera, es susceptible a las fuertes precipitaciones y a los movimientos telúricos por la falla geológica que también lleva su nombre. Debido a las precipitaciones que se dieron en éste sector durante el fenómeno de la niña en el año 2017 entre los meses de mayo y junio, se activaron varios deslizamientos que, a su vez, ocasionaron daños a la población civil de dicha vereda.

Con esta investigación se analiza la zona de remoción en masa de la vereda Servitá, con el fin de determinar el alcance de la amenaza a través de mapas que muestran desde el tipo de suelo, geología, geomorfología, pendientes, entre otros, hasta delimitar la zona que puede llegar a ser afectada por estos deslizamientos. Así mismo, se proponen diferentes soluciones de ingeniería, teniendo en cuenta la magnitud del deslizamiento y, en general, toda la zona que ha sido afectada.

Con base en los mapas generados, se puede evidenciar que el principal detonante en el deslizamiento es el grado de precipitación que, debido a su alta intensidad, erosiona el suelo, haciendo que este sea susceptible a movimientos en masa. Además, se le suman las características geomorfológicas locales, la actividad tectónica de la Falla Servitá, y las altas pendientes se suman en buena medida a esta problemática.

Palabras Clave: Amenaza, vulnerabilidad, deslizamientos, Cordillera Oriental, Colombia.

ABSTRACT

Villavicencio, the capital of the department of Meta, better known as La Puerta al Llano (Llanos Gate) is situated in the Colombian Llanos Foothills. The highway between Bogota and Villavicencio crossed the eastern flank of the Colombian Eastern Cordillera. The Servita landslide which the landslide of this research affected a part of this highway. This site that known as Vereda Servitá is located to 8 km to Villavicencio, present an annually high rate of heavy rainfall and seismic activity by tectonic activity of Servita Fault which has been recognized as active. These factors in part are the cause of the landslide development in this zone of the Eastern Cordillera.

Due to the high rates of rainfall that occurred in this area during 2017 La Niña (ENSO), the landslide of this research start its movement between the months of May and June. In this time were activated several landslides that in turn caused damages to the highway and households near or in this site.

Here with the research of the zone was analyzes the rock massif and the soils of this zone, with the order to determine the scope of threat through maps that show from the type of soil, geology, geomorphology, slopes, among others, to find that gave rise to the landslide. Likewise, different engineering solutions are proposed, taking into account the magnitude of these landslides and in general, the whole area that has been affected.

In this work find with the support of several thematic maps that the main trigger of the landslide are the high rates of rainfall that erodes the soil making that various types of material. Furthermore of this also are the local geomorphological characteristics, the active tectonics of the Servita Fault, and the high slopes contribute to a large extent to increase this geotechnical inconvenience to the highway and the households of the people of the Vereda Servitá.

Key Word- *Hazard, Vulnerability, Landslides, Eastern Cordillera, Colombia.*

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La falla Servitá es una falla con tectónica activa según [1]. A pesar de que existen estudios sobre la neotectónica y la expresión morfológica de la falla, no se han investigado aún los posibles problemas que esta produce en el sector que corresponde al trazo vial de la carretera entre Bogotá y Villavicencio (sector vía antigua).

Por ende, no sólo basta conocer la falla, sino que es necesario determinar también diferentes factores detonantes de los deslizamientos; en este caso, se hará especial énfasis a factores meteorológicos, hidrológicos e hidrometeorológicos. Además, se estudiará la influencia de las obras civiles que se han llevado a cabo en el sector durante los últimos años teniendo como sustento una base de datos proporcionada por Instituto Nacional de Vías (INVIAS), también por el Servicio Geológico Colombiano y complementada con registros periodísticos e informes encontrados en la web.

Al ser determinados de mayor a menor criticidad, los factores influyentes en los deslizamientos presentados en la vía, este estudio podría ser base para estudios futuros en pro de la mitigación del riesgo tanto para los trabajadores en la vía como para los usuarios que a diario transitan por la misma.

De esta manera, proporcionar un medio en que la comunidad pueda apropiarse del estado en que se encuentra el sector, con el objetivo de crear conciencia acerca de la importancia de la evaluación, las obras de reducción del riesgo y alertas tempranas.

1.1. Motivación y formulación del problema

Villavicencio es una de las capitales más importantes de Colombia, no solo por ser la capital del departamento del Meta, sino porque tiene la principal vía de conexión de la región Orinoquía con la capital del país, Bogotá D.C (Figura 1); sin embargo, su vía de conexión presenta diversidad de problemas debido a las condiciones climáticas, sísmicas y

topográficas que posee la región. La historia de la carretera se remonta a 1746 cuando se consolidó el denominado camino ganadero de San Martín de los Llanos. García [2] indica que: *...La ruta a los territorios de San Martín, ulteriormente intendencia del Meta, participó en alguna medida de los cambios operados en el país, en la segunda mitad del siglo XIX. Inicialmente, en 1870, se incorporó al esquema vial como camino nacional, y más adelante, en 1936, como carretera nacional...No obstante, durante este período se fue configurando a su alrededor una problemática que se ha proyectado hasta el presente, inhibiendo en alguna medida el desarrollo de la región. Puentes mal concebidos, falta de presupuestos, posibles decisiones sobre los trazados influidos por intereses particulares, deficiente administración de los recursos y complicaciones originadas por las condiciones geológicas de la cordillera Oriental, son algunos de los aspectos que fueron formando dicha problemática. También añade: ...La vía, sin embargo, continuó viendo crecer lentamente su influencia como vehículo de poblamiento, si bien no fue causa sino efecto del mismo, soportando el trajinar de comerciantes...colonos, arrieros, recuas y rebaños de ganado, conducidos por «vaqueros de a pie», prontos a calzar con alpargatas de fique las maltratadas pezuñas de los animales y hacer sonar el cacho a manera de aviso para los viajeros desprevenidos.*



Figura 1. Fotografía del camino Bogotá-Villavicencio, aproximadamente 1870; Fuente desconocida

La vía antigua Villavicencio - Bogotá, ha presentado continuamente deslizamientos que, probablemente, han sido reactivados por las obras civiles que se desarrollan con la construcción de la doble calzada aledaña al área estudiada, poniendo en peligro no sólo el personal que se encuentra trabajando durante largas jornadas, sino también a los habitantes del sector y usuarios de esta.

En el último año, las fuertes lluvias han sido detonante de grandes deslizamientos que no sólo han sepultado vehículos, sino que además han provocado la clausura de escuelas debido al cierre de las vías de acceso, causando grandes pérdidas económicas para quienes residen a lo largo de esta vía. Figura 2.

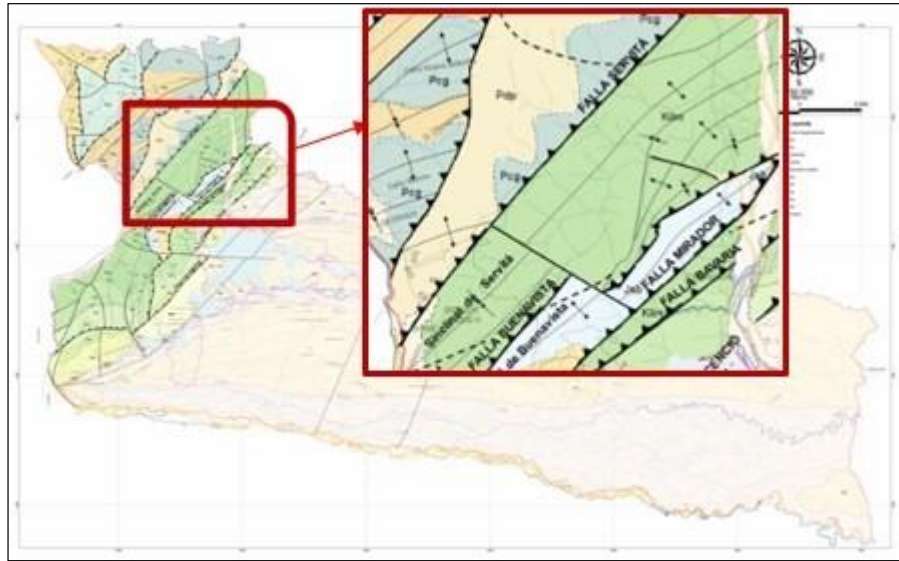


Figura 2. Localización del sector del análisis en el Mapa geológico del municipio de Villavicencio. Modificado de Chicangana (2009)

Son muchos los factores que podrían ser causantes y/o detonantes de estos fenómenos de remoción en masa, sin embargo, no es sencillo dar un juicio a la ligera que determine la criticidad de estos, por lo tanto, nos preguntamos ¿qué factores son los que tienen mayor grado de influencia en los deslizamientos presentados en las cercanías del sector de Servitá?

1.2. Finalidad

La vía Bogotá – Villavicencio es uno de los corredores más importantes a nivel nacional, ya que esta es la principal vía de comunicación de los llanos orientales con el resto del país; sin embargo, para el paso de vehículos pesados, es utilizado el trayecto vial (vía antigua), que va desde la Glorieta de la Grama, en la ciudad de Villavicencio hasta el empalme con la vía nueva en la vereda Pipiral.

Este trayecto vial, el cual cuenta con 15 km de longitud, forma parte de la antigua ruta que constituía la carretera Bogotá - Villavicencio. El trazado de la vía data del siglo XVIII y formaba parte del antiguo camino real que conducía a San Martín de los Llanos. Como

carretera para automotores este trazado vial se ajustó desde 1936, y desde entonces, se ha ido ampliando su ancho de calzada.

Este trayecto vial cruza un sector de alta complejidad geológica en el piedemonte oriental de la cordillera oriental, caracterizándose por cruzar litologías con estados de meteorización altos y paquetes rocosos sedimentarios, de espesores superiores a varios centenares de metros, limitados por fallas o discordancias constituidas por estructuras que superan en su dimensión varios centenares de metros. Además de lo anterior, esta región presenta una alta tasa de pluviosidad anual, la cual varía entre 4 y 5 metros de precipitación al año.

Debido a las causas anteriormente señaladas, este trayecto vial presenta frecuentes fenómenos de remoción de masa. Para INVIAS, este trazo de vía, para entre el mediano a largo plazo está planeado como ruta de alivio frente al exceso de tráfico que presentará eventualmente por temporadas la actual vía doble calzada Bogotá-Villavicencio, sobre todo en lo que al transporte de carga pesada se refiere. La vía doble calzada Bogotá-Villavicencio la cual para el sector de Villavicencio estará culminada a partir del año 2020.

Debido a que este trazo vial seguirá siendo empleado como ruta de alivio a la vía nacional, en este trabajo se buscará encontrar soluciones de ingeniería que traten de reducir el impacto producido por fenómenos de remoción de masa con el estudio del caso específico que desde el 22 de Julio del 2017, se viene presentando en la vereda Servitá del municipio de Villavicencio.

Los fenómenos de remoción de masas son eventos potenciales, pero impredecibles en esta vía, los cuales suelen causar retrasos desmesurados en el tiempo de llegada de una capital a otra y, en condiciones más trágicas, heridos y muertes. Las pérdidas tanto humanas como de capital son demasiado grandes, por lo tanto, es pertinente establecer los factores detonantes de los mismos, para poder implementar estrategias que, si bien no siempre van a solucionar dicho problema de forma definitiva, pueden ayudar a mitigar los daños futuros.



Figura 3. Fotografía aérea del estado de la zona afectada por la remoción de masa en la Vereda Servita el 23 de junio de 2017, Fuente propia



Figura 4. Fotografía aérea del estado de la zona afectada por la remoción de masa en la Vereda Servita el 2 de noviembre de 2017; Fuente propia

Así mismo, este proyecto tiene como fin estudiar las principales causas y los sistemas de mitigación de los daños ocasionados por los deslizamientos ocurridos en la zona de la vereda

Servitá, a partir de las características climáticas, principalmente hidrológicas, en las que se encuentra el sector a estudiar, también la geología, geomorfología, uso de suelo y actividades antrópicas; al mismo tiempo, la correlación para generar dichas situaciones, Figura 3 y Figura 4.

Por ende, esta investigación tiene como objetivo generar un aporte a la línea de investigación de Gestión del Riesgo, con el apoyo del grupo de investigación “Geoamenazas e Ingeniería Civil”.

1.2.1. Objetivo General

Analizar la zona de remoción en masa de la vereda Servitá, municipio de Villavicencio, identificando los principales factores detonantes con el fin de estimar el alcance de la amenaza y dar soluciones de ingeniería.

1.2.2. Objetivo Específicos

- Establecer un aproximado de la cualificación y cuantificación de los daños ocasionados por los deslizamientos mediante la recopilación de información.
- Corroborar mediante información proporcionada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM y el Sistema de Información de Movimientos en Masa - SIMMA, el aumento de los deslizamientos respecto al cambio de las condiciones climáticas, en el sector estudiado.
- Estimar la amenaza de los deslizamientos ocasionados por factores climáticos, antrópicos y sísmicos, teniendo en cuenta la geología, geotecnia y topografía de la vía.
- Realizar un análisis de vulnerabilidad ante los deslizamientos, mediante la calificación de características relacionadas con infraestructura, tránsito vehicular y personas.
- Determinar las consecuencias de las construcciones actuales a los presentes y futuros deslizamientos ocurridos en el área de la vereda Servitá.

1.3. Aportes del Trabajo

Este proyecto pretende analizar y evaluar los factores detonantes de los deslizamientos presentados en los alrededores de la vía Bogotá-Villavicencio en la zona de la Falla de Servitá, de tal modo en que se pueda determinar el grado afectación sobre la infraestructura

y bienes en el momento de la ocurrencia de los deslizamientos, criterio que será base para establecer los mapas de amenaza, vulnerabilidad y el riesgo, determinando así las posibles soluciones en ingeniería civil, que se contemplan en caso de no tener solución la estabilización de la ladera, la construcción de viaductos o túneles que salvaguarden tanto el tránsito como la infraestructura vial de los siniestros.

Capítulo 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y CIENTÍFICA

2. MARCO TEÓRICO

2.1. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología es una rama de la geología que se encarga del estudio de los cambios de la forma de la superficie terrestre, formas como ríos, colinas, planicies, playas, dunas de arena, etc. [3] Expertos en el tema hoy en día se encargan de estudiar procesos, forma e historia; concernientes a la forma de la tierra. Sin embargo, diferentes factores pueden influir en estos cambios, así como el movimiento de la litósfera o los mismos cambios meteorológicos presentes en la zona que se estudie.

Las geoformas se definen como elementos tridimensionales, es decir, generan un relieve, y se pueden identificar con su topografía, drenaje, textura, tono, vegetación natural y uso del suelo. Además, están compuestas por materiales como arenas, gravas, arcilla o cuerpos masivos. [4]

Es sustancial para este estudio identificar y caracterizar las geoformas de forma detallada, es necesario hacerlo desde diferentes puntos de vista como: morfogénesis, morfodinámica y morfométrica. [5]

2.1.1. Morfogénesis

Estudia las causas y procesos que dieron la forma al paisaje. El origen del paisaje depende de agentes endogenéticos y la modificación de los agentes exogenéticos como el agua, el viento y el hielo, que actúan sobre la superficie modelando el terreno. [6]

2.1.1. Morfodinámica

Según el SGC (SGC, 2015) la morfodinámica muestra la distribución espacial de los movimientos que se han producido en la superficie terrestre y el comportamiento del relieve según las características del material.

2.1.2. Morfometría

Según el SGC [5] la Morfometría:

“Trata de aspectos cuantitativos en términos de pendientes, Rugosidad y Acuenca. También se incluye la comparación según la relación geométrica entre las diferentes posiciones espaciales”.

2.2. MOVIMIENTOS EN MASA

2.2.1. Desprendimiento o caídas

Este tipo de movimiento en masa se da, principalmente, en superficies ortogonales al suelo o empinadas, en donde se desprende la masa del suelo y/o rocas mediante caída libre, con posterior rebote o rodadura. Este movimiento suele ser rápido y al impactar con el suelo la masa de suelo fragmentarse; el impacto depende de la inclinación de la ladera o acantilado, ya que cuando esta es superior a 73° , el impacto es más fuerte y las posibilidades de que se fragmente la masa de suelo son mayores [7].

2.2.2. Flujos

Este movimiento se denomina así porque, generalmente, tiene el comportamiento de un flujo. Es por esta razón que la masa movida no conserva su forma original, adoptando, a menudo, formas lobuladas cuando interactúan con materiales cohesivos y desparramándose por la ladera o formando conos de deyección cuando afectan a materiales granulares.

En el flujo de detritos es un movimiento rápido en donde se combinan parte del suelo perdido, rocas, material orgánico, aire, y agua, que corren montaña abajo, donde menos del 50% del material presente es fino. El flujo de detritos, generalmente es causado por altas precipitaciones que saturan y erosionan el suelo, provocando que el material se desplace [8]. La reptación es un movimiento demasiado lento, casi imperceptible que va deformando el suelo con el paso del tiempo debido a un esfuerzo cortante, pero es tan pequeño este esfuerzo que no alcanza a producir una falla de corte [8]

2.2.3. Deslizamientos

Los deslizamientos son procesos de remoción en masa que se han presentado desde tiempos inmemorables y que seguirán presentándose también a medida que la sociedad va creciendo, teniendo consecuencias desastrosas para los activos que se presenten en su zona de susceptibilidad ya sean personas o activos materiales. Figura 5



Figura 5. Deslizamiento. [9]

Por ende, se deben tener en cuenta las etapas presentes en la clasificación de los movimientos que son

- a) La etapa de deterioro o antes de la falla.
- b) La etapa de falla, caracterizada por el movimiento de una masa importante de material.
- c) La etapa post-falla, que contempla los movimientos de masa involucrada en el momento de la falla y hasta el preciso instante en que se detiene totalmente
- d) La etapa de posible reactivación, en la cual pueden ocurrir más movimientos.

Los deslizamientos pueden clasificarse con base en la velocidad, es decir:

2.2.3.1. Deslizamientos lentos

Se caracterizan porque las capas de suelo superficiales se mueven relativamente lento; siendo en ocasiones levemente apreciables. Este tipo de deslizamiento tiene un impacto mínimo en las obras o construcciones existentes, siempre y cuando toda la masa se deslice al mismo tiempo.

2.2.3.2. Deslizamientos rápidos

A menudo el deslizamiento se produce en terrenos con pendientes altas, presentándose en ocasiones que la masa de terreno lleve tanta fuerza que tenga la capacidad de subir hasta un contrapendiente.

2.2.3.3. Deslizamientos traslacionales

Es un movimiento en masa a lo largo de una superficie de falla plana u ondulada; suelen ser más superficiales que los rotacionales; ocurriendo con frecuencia a lo largo de discontinuidades de fallas. [9]

Si el deslizamiento se realiza a través de un solo plano, se denomina planar, si el deslizamiento está delimitado por dos planos de discontinuidad, se conoce como deslizamiento en cuña. Estos deslizamientos suelen variar su velocidad desde rápida a extremadamente rápida. Figura 6.

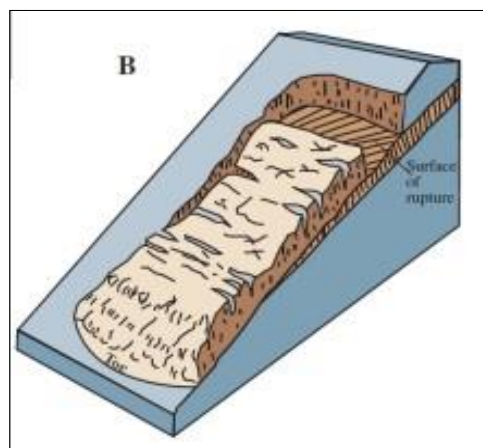


Figura 6. Deslizamiento traslacional. [8]

2.2.3.4. Deslizamientos rotacionales

En este deslizamiento, la falla se mueve a lo largo de una superficie de falla cóncava o curva, caracterizada por su morfología. A diferencia del traslacional, los deslizamientos rotacionales tienen una velocidad de ocurrencia que oscila entre lenta y rápida, menores a 1m/sg. Figura 7.

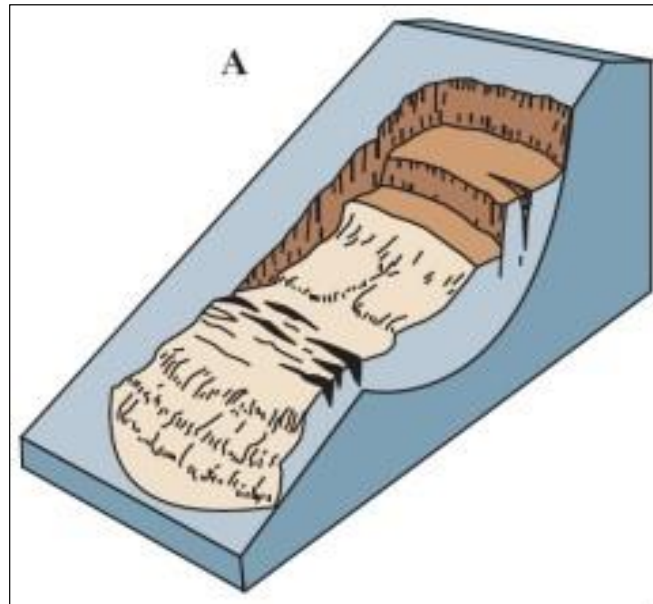


Figura 7. Deslizamiento rotacional. [8]

2.2.4. Factores que controlan los deslizamientos

2.2.4.1. Factores internos

Las causas se pueden clasificar dependiendo de los factores a los que se asocian, es decir, factores externos, siendo estos aquellos que no se refieren directamente a la naturaleza del suelo y los factores internos que son las características geológicas y mecánicas del suelo, entre otras.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que, dentro de las variadas y numerosas causas de deslizamiento, una de las más importantes es el agua, ya sea por flujo subsuperficial o de origen pluvial.

a. Angulo de fricción interna

Las partículas del suelo afectan la cohesión masiva del cuerpo del suelo al tender a pegarse y generando fricción entre sí, lo que se conoce como fricción interna o resistencia al cizallamiento y está determinada por el tamaño y forma de las partículas y el grado en que las partículas se tocan. El ángulo no es necesariamente el ángulo de la pendiente, pero es el ángulo de fricción interna dentro de la masa de la pendiente y representa el ángulo

de contacto entre las partículas que componen el suelo o masa no consolidada y la superficie subyacente [3].

Cuanto menor sea el ángulo de rozamiento interno, es decir cuanto más plástico sea el suelo, mayor facilidad tendrá este para deslizarse. Como ocurre con la arcilla y rocas con contenido de talco, caolín, entre otros componentes lubricantes [10]

b. Tipo de roca

Cada formación geológica posee una susceptibilidad específica a los deslizamientos, por ende, Cuando un talud está formado por varios tipos de roca, el comportamiento geotécnico del conjunto es diferente al de cada material por separado.

2.2.5. Factores externos

c. Sismicidad

Las respuestas a los movimientos sísmicos es la reactivación de fallas, disminución de la resistencia al cizallamiento de los materiales, procesos de licuefacción entre otros que conducen a deslizamientos cosísmicos y tsunamis.

Ejemplo de cosísmico: Figura 8.



Figura 8. Deslizamiento cosísmico resultante del sismo de 24 de mayo de 2008 en Quetame, Cundinamarca [11]

d. Pendiente

No es necesario aclarar que, en un terreno llano con relación a las fuerzas del deslizamiento, construirá un obstáculo para que se produzca un deslizamiento, por ende, se precisa que sea del 1% para permitir inicialmente corrientes de lodo.

e. Deforestación y/o efecto antrópico

La ausencia de una buena cobertura de capa vegetal favorecerá los proceso de deslizamiento, puesto que esta constituye a uno de los principales elementos de estabilidad del terreno debido a que las raíces de las “plantas/árboles” son responsables de mantener el suelo en su lugar, funcionando como un marco que evita que sea erosionado, por ende, cuando ha sido erosionada la capa superior del suelo, es mucho más difícil que crezcan nuevas plantas, y la falta de raíces que estabilice lleva a más erosión [12]

f. Precipitaciones y condiciones climáticas

El efecto que la lluvia provoca sobre los materiales es el incremento de presiones intersticiales, la elevación del nivel freático y el flujo de agua a través del terreno. Todo ello disminuye la resistencia al corte de los materiales, además de elevar su peso e influir en sus propiedades resistentes [13] por lo que es pertinente afirmar que muchos de los deslizamientos son causa del comportamiento hidrogeológico y del desequilibrio que este genera en algunos tipos de suelo.

g. Meteorización del macizo rocoso

La meteorización es la descomposición de las rocas por desintegración mecánica y descomposición química. Muchas rocas se forman bajo altas temperaturas y presiones profundas en la corteza terrestre. Cuando se exponen a las temperaturas y presiones más bajas en la superficie de la Tierra y entran en contacto con el aire, el agua y los organismos, comienzan a descomponerse. [3]

h. Procesos erosivos

Los procesos erosivos de erosión fluvial, o de otro origen, que afectan al pie de las laderas, y a la socavación que, debida a diferentes factores, se produce en ocasiones en el interior del terreno. La erosión de la base de las laderas da lugar a la pérdida de material, implicando una disminución de la resistencia en la zona y la falta de apoyo de los materiales suprayacentes. [13]

3. MARCO CONCEPTUAL

Las zonas montañosas tropicales son muy susceptibles a sufrir problemas de deslizamientos de tierra debido a que generalmente, se reúnen cuatro de los elementos más importantes para su ocurrencia tales como son la topografía, sismicidad, meteorización y lluvias intensas [14]. Elementos que deben ser tenidos en cuenta para la elaboración y zonificación de la amenaza actual o potencial, que determinarán etapas para el análisis del riesgo a medida que se van correlacionando con la vulnerabilidad tanto de la población como de elementos estructurales y demás.

Por ende, hay que entender la amenaza como un peligro latente de que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de modo accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales [5], la cual puede ser reducida o mitigada si se hacen las evaluaciones y estudios pertinentes, siguiendo las metodologías propuestas por las entidades conocedoras y autorizadas del tema.

En este sentido, es necesario tener claro que una ladera, es una masa de tierra que no es plana, posee pendiente y significativos cambios de altura; características que se deben a la formación natural del terreno, y las cuales pueden fallar en el momento menos esperado por diversos factores.

4. MARCO GEOGRÁFICO

El área de estudio se encuentra ubicada en el Municipio de Villavicencio, en el sector mejor conocido como la Vereda Servitá, Figura 9, al noroccidente de la ciudad, por la vía antigua a Bogotá. Teniendo un área de afección de 17km^2 y perímetro de 16km aproximadamente, cómo se indica en el polígono de color amarillo; así mismo, en el polígono de color rojo, se enmarca el área crítica a estudiar, el cual tiene un área de 161918m^2 y un perímetro de 1746m aproximadamente, con coordenadas $X = 955000$ $Y = 1041000$.

Este sector se encuentra influenciado por la Falla Servitá, Figura 10, en el cual, el empuje efectuado en la cordillera se da por la Placa Nazca hacia la placa fija (Placa Suramericana) que se presenta en el bloque es de 7 mm/año y el ascenso es de 3 mm/año .

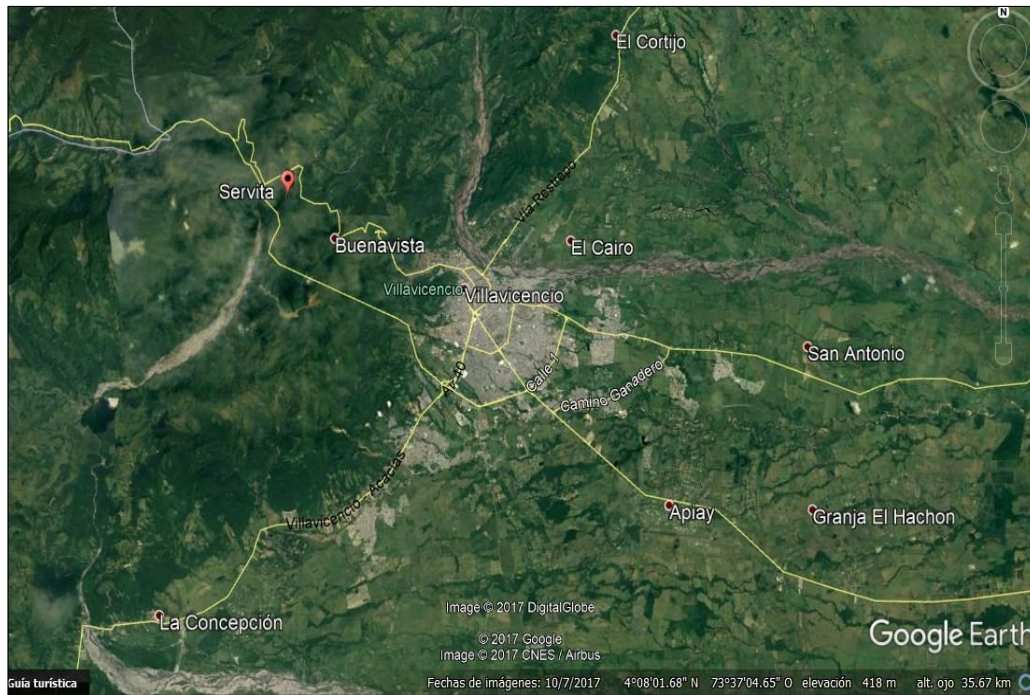


Figura 9. Ubicación de la vereda Servitá en el municipio de Villavicencio; Imagen satelital Google Earth©; Fuente propia

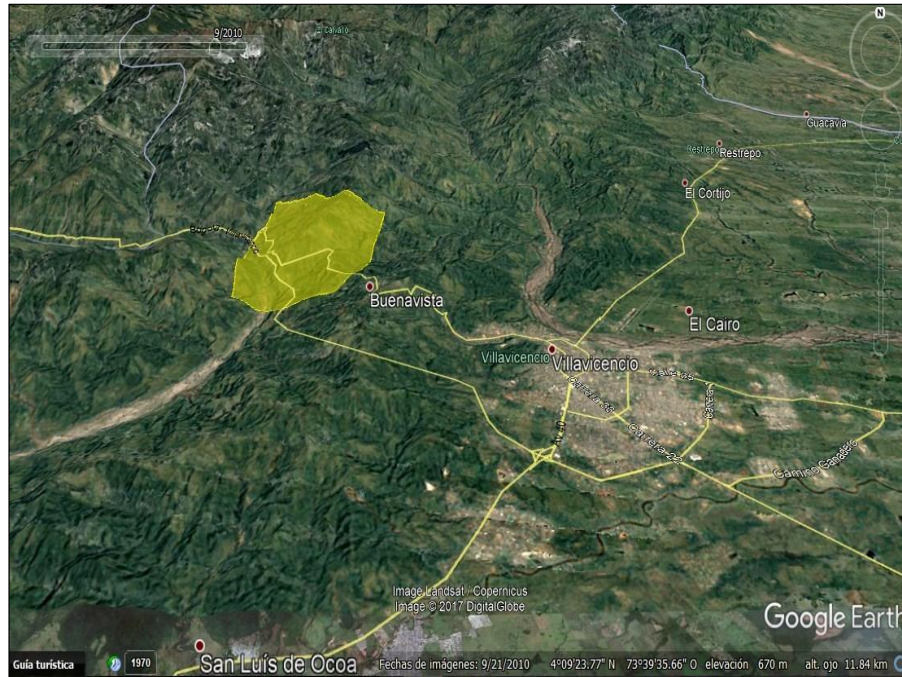


Figura 10. Zona demarcada que corresponde al sector de estudio. Imagen satelital Google Earth©; Fuente propia



Figura 11. Área de la zona de análisis con el trazo de la vía en la vereda Servitá con el trazo que indica la Falla de Servitá en esta región. Imagen satelital Google Earth©;Fuente propia

El bloque en ascenso, Figura 11, en sus inicios (aproximadamente hace 2 millones de años) se encontraba conformado por el Cretácico inferior con la Formación Lutitas de Macanal,

seguido por el Jurásico superior con la Formación Brechas de Buenavista y después por el lapso Devónico - Carbonífero con la Formación Capas Rojas del Guatiquía, sin embargo, gracias a su ascenso por el empuje de las placas, el constante cambio en la nubosidad y el incremento de las lluvias, se han presentado procesos de meteorización y erosión en las dos primeras capas, llevándolas a su desaparición.

.

5. MARCO NORMATIVO

Tabla 1. Marco normativo. Fuente: Elaboración propia.

AÑO	TÍTULO	OBJETIVO
2012	LEY 1523	Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones
2014	Decreto 1807	Establecen las condiciones y escalas de detalle para incorporar de manera gradual la gestión del riesgo en la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo de los planes de ordenamiento territorial municipal y distrital o en la expedición de un nuevo plan.
2012	DECRETO 019	Los trámites, los procedimientos y las regulaciones administrativas tienen por finalidad proteger y garantizar la efectividad de los derechos de las personas naturales y jurídicas ante las autoridades y facilitar las relaciones de los particulares con estas como usuarias o destinatarias de sus servicios de conformidad con los principios y reglas previstos en la Constitución Política y en la ley

Elaboración propia

6. ESTADO DEL ARTE

El Sistema Geológico Colombiano, antiguo INGEOMINAS, a lo largo de los últimos años ha desarrollado manuales con el fin de identificar la amenaza, el riesgo y la vulnerabilidad, de los sectores o terrenos con geoamenazas inminentes; es por eso que en este proyecto se ha tomado como base parte de esta metodología, para el desarrollo del mismo. [6] y [5].

Se han realizado estudios con el fin de comprender los factores externos que influyen en los deslizamientos, en donde se ha determinado que las lluvias torrenciales pueden disminuir la dureza de la roca en el suelo, lo cual puede provocar deslizamientos; además que las excavaciones superficiales también pueden inducir a un deslizamiento [15].

Por otro lado, se ha deducido que los deslizamientos antiguos también se convierten en detonantes para los deslizamientos futuros, es decir, que generan dependencia e inestabilidad en el terreno. Sin embargo, esto también depende de la topografía, el índice de humedad y la pendiente del terreno. Bajo un modelo logístico binario, se podría predecir la probabilidad de la ocurrencia de estos eventos [16].

En un estudio realizado en la Comuna 8 del municipio de Villavicencio, se analizaron los factores climáticos, la pendiente del terreno y la saturación del suelo, se determinó que es necesaria la realización de obras de drenaje que comuniquen directamente con canales naturales, para así evitar la saturación del suelo [17].

También se han realizado estudios con respecto a las fuentes sismogénicas que afectan a Villavicencio, tanto en zona plana como en zona montañosa. Se encuentra que la ciudad está atravesada por el sistema de fallas del Guaicáramo y que es probable que en los próximos años se desate un sismo de magnitud mayor a 7, el cual podría generar grandes tragedias para la ciudad, entre estas, fenómenos de remoción en masa, que sin prevención podrían cobrar vidas. [18]

6.1. Conclusión del Capítulo

Los fenómenos de remoción en masa pueden variar de acuerdo a la composición del terreno y a la forma en que se desprenden. Sin embargo, esto también depende de factores externos tales como la humedad, las lluvias, trabajos cercanos del hombre, deforestación, fallas geológicas, entre otros. Servitá reúne todos estos aspectos dado a que está ubicada sobre una zona de falla y a que las lluvias que se presentan en el sector son constantes; se hace necesaria

la planeación territorial para que a corto y mediano plazo se eviten incidentes y accidentes que puedan causar la pérdida de vidas humanas.

Finalmente, gracias a los estudios que se han realizado hasta el momento, no sólo en Villavicencio sino alrededor del mundo sobre los deslizamientos y fenómenos de remoción en masa, se puede esperar que el principal factor detonante sea el agua por la sobre saturación del terreno; además que el cambio climático ha sido uno de los principales causantes de esto. La amenaza de los deslizamientos en Servitá es inminente, por lo tanto, es necesario establecer y delimitar hasta dónde afectará tanto a los habitantes de la zona como a quienes tengan que transitar por este sector, con el fin de evitar y/o mitigar los daños que se puedan ocasionar tras este fenómeno.

Capítulo 3. METODOLOGÍA

7. METODOLOGÍA

Para este proyecto se utilizará como base la metodología proporcionada por el Servicio Geológico Colombiano, la cual es fundamental para la zonificación de la amenaza y la identificación de la vulnerabilidad del terreno a estudiar.

7.1. Recolección de información

Se solicitará a INVIAS información relacionada tanto con las obras ejecutadas en la vía como un registro de deslizamientos que hayan ocurrido en los últimos años; para complementar esta información, se realizará una búsqueda exhaustiva en internet, teniendo como fuente principal las plataformas virtuales de los periódicos y las redes sociales de INVIAS, para obtener con fechas más exactas la ocurrencia de los deslizamientos. También se consultará la página del servicio geológico colombiano, con el fin de tener información más precisa.

Además de esto, se realizará la solicitud virtual al IDEAM de datos mensuales de estaciones hidrológicas, meteorológicas e hidrometeorológicas, que estén ubicadas lo más cerca posible al área de Servitá y alrededores, creando así una base de datos que permita relacionar todo.

Los puntos claves de la primera etapa son:

- Clasificación de la información
- Caracterización e interpretación de los datos geológicos
- Caracterización e interpretación de los datos geomorfológicos

7.2. Elaboración del mapa de la zona afectada por el movimiento de remoción de masa.

Con la información obtenida y organizada de las diferentes fuentes, se realizará un mapa en planta del sector, el cual tendrá los puntos de la zona en donde se presenta el deslizamiento. de este modo, se realizará un mapa que muestre el alcance de la zona susceptible a removerse.

7.3. Análisis hidrometereológico

Con los datos obtenidos del IDEAM, se calcularán los índices de precipitación anuales para establecer los niveles de escorrentía y de posible erosión que tiene el suelo ante estos eventos.

7.4. Análisis morfométrico

Para determinar si en la región que abarca el macizo rocoso, los procesos erosivos obedecen a un régimen tectónico o a un régimen climático (pluviométrico) o por ambos, se realizará un análisis morfométrico teniendo presente la aplicación de diferentes índices geomórficos siguiendo la metodología de Keller y Pinter [19], y tomando en consideración los criterios de Burbank y Anderson [20].

En la Figura 12 se muestra el índice que se aplicará en este trabajo y que es la relación longitud de drenaje versus la pendiente topográfica.

La definición de los índices es la siguiente: [19]

f. Índice entre la longitud de un drenaje versus su gradiente de pendiente

Indica que conforme los valores de este aumentan, estos serán directamente proporcionales al incremento de la tasa de levantamiento de un orógeno, lo cual también está regido por el grado de la actividad tectónica de un lugar (Figura 12.B).

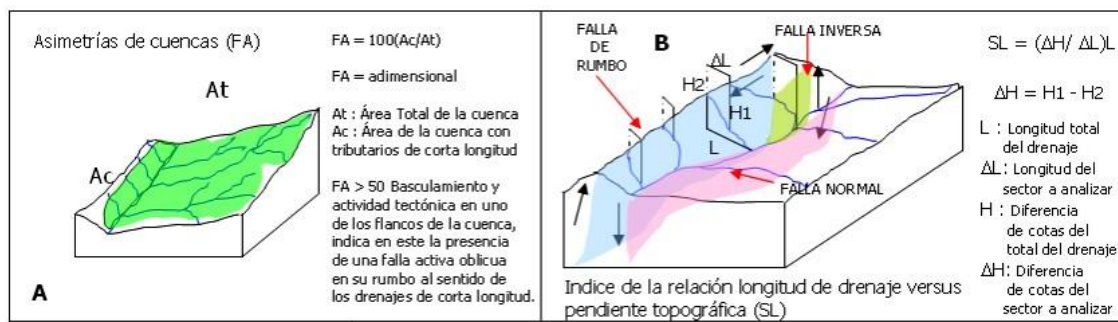


Figura 12. Índices geomórficos empleados en esta investigación para la caracterización de geomorfología tectónica. A: Asimetría de cuencas. B: Índice de la relación entre la longitud de los drenajes y la pendiente topográfica por donde discurren estos. Modificado de [19] en [11]

7.5. Mapeo de las obras realizadas en los últimos años

Se utilizarán planchas cartográficas del IGAC a escala 1:500 con uso de ortofoto para modelo de elevación digital. y 1:25000 para verificación morfométrica con la ayuda de reportes del Ministerio de transporte y registros de INVIAS de las obras ejecutadas, las zonas en donde

se han llevado a cabo obras durante los últimos diez años en el sector, usando como herramienta el software Arcgis.

7.6. Análisis de resultados

Con base en los datos obtenidos del IDEAM, la pendiente topográfica, verificación multitemporal de movimientos de remoción de masa, características geológicas y geotécnicas del macizo rocoso en el sector de estudio, influencia antrópica, siguiendo recomendaciones del SIMMA del SGC, y verificación del alcance con base en los eventos ocurridos recientemente, se establecerá el grado de afección.

7.7. Zonificación de la amenaza

En esta etapa se realizarán los mapas a escala 1:5000 que mostrarán las zonas más amenazadas por los deslizamientos presentados en el sector de la vereda Servitá.

Dentro de los mapas propuestos se tiene: uso de suelo, geomorfología, vegetación y el mapa de zonificación de la amenaza.

7.8. Zonificación de la vulnerabilidad

En esta etapa se realizarán mapas a escala 1:5000 que mostrarán las zonas con vulnerabilidad al deslizamiento en el sector estudiado de la vereda Servitá.

7.9. Zonificación del riesgo

En esta etapa se realizarán los mapas a escala 1:5000 que mostrarán las zonas con riesgo producido por el deslizamiento presentado en el sector de la vereda Servita

7.10. Propuestas de posibles soluciones en ingeniería

Finalmente, con los resultados arrojados por esta investigación y con los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, se expondrán posibles soluciones de ingeniería para la problemática del sector.

Capítulo 4. RESULTADOS

8. RESULTADOS

En el desarrollo del proyecto, conforme al cumplimiento de los objetivos, se esperarán los resultados que se muestran en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Resultados esperados Fuente: Elaboración propia

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Interpretación y comparación de la información recopilada, para establecer la base teórica de la investigación mediante la cartografía e imágenes satelitales.	Mapa	Objetivo específico 1
Diagnóstico y valoración del estado del suelo mediante la evaluación de los datos proporcionados por el IDEAM	Informe	Objetivo específico 2
Evaluación de la amenaza por movimientos en masa mediante la aplicación de los software de modelación como ArcGis	Modelo	Objetivo específico 3
Valoración del estado actual de la zona de acuerdo con su infraestructura, tránsito de vehículos y de personas.	Informe	Objetivo específico 4
Zonificación de la amenaza de la zona de estudio	Mapa	Objetivo específico 5 y 6
Posibles soluciones de ingeniería para la zona afectada	Informe	Objetivo específico 7

Elaboración propia

8.1. Geología de la región de estudio

La Geología de la región del estudio se constituye de varias unidades de roca, las cuales abarcan en edad desde el Neoproterozoico Tardío hasta el Cuaternario. El principal elemento estructural es la falla de Servitá que es una falla de cabalgamiento de primer orden. Hacia el

oriente de esta falla se presenta el anticlinal de Buenavista (Figura 13 y Figura 14) que se constituye de rocas sedimentarias que abarcan en edad el Jurásico Superior representado por la Formación Brechas de Buenavista, la cual es el núcleo del anticlinal, y hacia los flancos la Formación Lutitas de Macanal. Esta última está cortada al occidente por la Falla Servitá, mientras al oriente del anticlinal, a la Formación Lutitas de Macanal la recubre la Formación Areniscas de Caqueza (Arenisca de Las Juntas), a esta última la recubre la Formación Fómez y a su vez esta es recubierta por las areniscas de la Formación Une. Estas dos últimas unidades están parcialmente cubiertas por sedimentos del Cuaternario, y en parte afloran al occidente de la ciudad de Villavicencio (Figura 13).

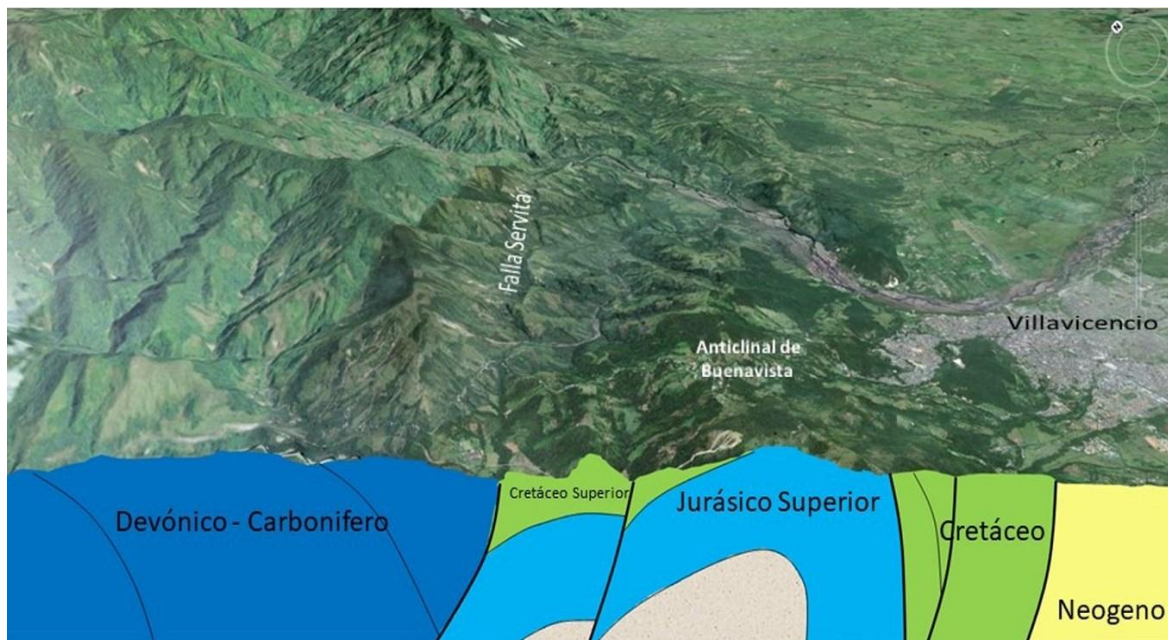


Figura 13. Corte geológico que muestra de manera idealizada las unidades de roca que se presentan en la zona de estudio.
Fuente: Elaboración propia. (Las rocas del Complejo Quetame no alcanzan a observarse en esta figura)



Figura 14. Formaciones geológicas de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia. Anexo 1

8.1.1. Filitas y cuarcitas de Susumuco (complejo de Quetáme) ediacariano (NPCSU)

Según [21] es una unidad constituida por una alternancia de cuarcitas blancas de grano grueso y metaconglomerados constituidos por fragmentos de cuarcitas, filitas y esquistos. Petrográficamente se trata de metaconglomerado cuarzosericítico, de textura hetero blástica granolepidoblastica, con cuarzo sericita, moscovita biotita, fragmentos de cuarcita foliada, magnetita, limolita, epidota, turmalina y piritita. En verificación de campo, pasando el puente de la quebrada Susumuco de la vía Bogotá-Villavicencio, en la margen derecha de la quebrada afloran cuarcitas fuertemente fracturadas y extremadamente duras con zonas de oxidación (Figura 15 y Figura 16).



Figura 14. Aspecto de la Quebrada Susumuco, con Cuarcitas en sus orillas, relacionadas a las Cuarcitas y Filitas de Guayabetal, en límites de los departamentos de Cundinamarca y Meta. Fuente: Elaboración propia.

Como unidad del Complejo Quetáme se asume en edad relativa del Neoproterozoico tardío preferiblemente correspondiente al lapso Criogeniano -Ediacariano. El Complejo Quetáme de acuerdo a estudios recientes se correlaciona con el Complejo Cajamarca que aflora en la cordillera Central, y en el departamento de Santander con la Formación Silgará en la cordillera Oriental.



Figura 15. Afloramiento de las cuarcitas pertenecientes a las Cuarcitas y Filitas de Susumuco en la margen izquierda de la Quebrada Susumuco, en límites de los departamentos de Cundinamarca y Meta. Esta unidad de roca pertenece al Complejo Quetame. Fuente: Elaboración propia.

8.1.2. Formación Lutitas de Pipiral

Es la unidad media del Grupo Farallones y se compone de una alternancia de estratos compuestos por areniscas de grano medio, con conglomerados, calizas y limolitas silíceas. En afloramiento observable en el nacimiento de la quebrada La Esmeralda al norte de la vereda de Servitá, en se observa un paquete grueso de esta unidad (Figura 17). En este afloramiento el cual dista de la zona de estudio 500 m, los estratos varían en espesor de entre varias decenas de centímetros hasta varios metros.



Figura 16. Afloramiento de la Formación Lutitas de Pipiral en el sector correspondiente al nacimiento la Quebrada La Esmeralda, Vereda de Servitá. En este sector al pie del afloramiento, no observable en la foto, se encuentra el contacto fallado con la Formación. Fuente: Elaboración propia.

La meteorización de esta unidad de rocas da como resultado material granular como gravas y arenas (Figura 17). Esta unidad corresponde al macizo rocoso que está produciendo el fenómeno de remoción objeto de análisis de este trabajo.

El espesor total de la unidad aflorante en el sitio del deslizamiento y las vecindades es de aproximadamente 500 mts, desde la divisoria de aguas hasta en la parte baja donde se encuentra la quebrada Servitá.

8.1.3. Formación Brechas de Buenavista: Jurásico Superior (Titoniano)

Esta unidad aflora en el núcleo del anticlinal del mismo nombre de la unidad que define la cuchilla montañosa que se conoce localmente como el alto de Buenavista hacia la parte norte de Villavicencio. Es difícil reconocerla en campo debido a que se encuentra en avanzado estado de meteorización. En algunos lugares como el mirador de “La Piedra del Amor” se presenta como un conglomerado polimictico que están compuestos de clastos de diferentes tamaños en matriz arenolodosa muy silíceea. De acuerdo a Pulido et al. (1998), la litología tipo está constituida por fragmentos y bloques angulosos a redondeados de filitas, cuarcitas, areniscas, calizas y cuarzo lechoso, englobados caóticamente en una matriz areno arcillosa.

8.1.4. Formación Lutitas de Macanal: Cretáceo Inferior (Berrasiano)

La Formación Lutitas de Macanal se presenta con buenos afloramientos de roca fresca en las márgenes derecha de la Quebrada La Esmeralda hacia el norte y en la margen izquierda de la Quebrada Servitá al sur. El afloramiento observado en proximidad a la falla Servitá consta de limolitas color verde grisáceo con laminación de un espesor promedio de 5 mm. Las limonitas laminadas (Lutitas) tienen espesores totales que varían de entre 1 a 3 m. (Figura 18 y Figura 19)



Figura 17. Aspecto de las limolitas con espesores de 3 m de la Formación Lutitas de Macanal que afloran en la margen derecha de la Quebrada La Esmeralda. Fuente: Elaboración propia.



Figura 18. Aspecto de las limolitas (lutitas) con laminación de espesor 5 mm de la Formación Lutitas de Macanal que afloran en la margen derecha de la Quebrada La Esmeralda. Los bloques de diverso tamaño y las arenas forman parte de los sedimentos de la quebrada. Fuente: Elaboración propia.

8.1.5. Terrazas y Coluviones: Cuaternario (Pleistoceno Superior)

Se conforman de sedimentos que derivan de la evolución local de la cuenca del río Negro (Figura 20). Localmente las terrazas tienen una altura de 30 m y en su evolución en la que se combina la tectónica y el aporte fluvial en un tiempo aproximado de 500.000 años, como producto del ascenso de la cuña estructural que está delimitada entre la falla Servitá al occidente y la falla Mirador al oriente. Estas terrazas se conforman de arenas y gravas cuyo origen es fluvial, y en menor proporción coluvial (construido a partir de procesos de remoción de masa).



Figura 19. Panorámica del sector de La Reforma, en el occidente de Villavicencio Fuente: Elaboración propia. En primer plano se observan las terrazas Pleistocénicas derivadas de la evolución de la cuenca del río Negro – Guayuriba en un contexto local. Al fondo se observa el cerro de Buenavista. Las flechas indican por donde se presenta la Falla Servitá que coincide con el curso de la Quebrada Servita

8.1.6. Falla Servitá

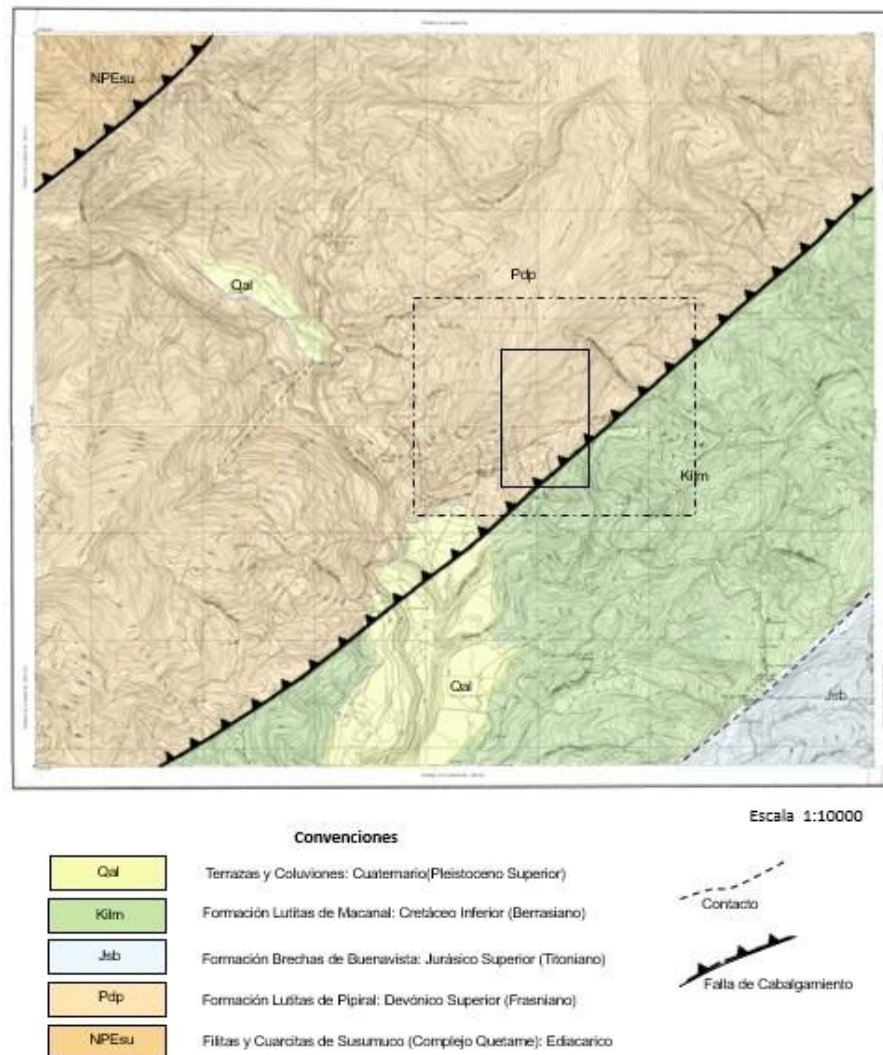


Figura 20. Mapa geológico de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

Se trata de una gran falla inversa del tipo de cabalgamiento (thrust) que separa localmente unidades de edad Devónico (Formación Lutitas de Pipiral) con rocas de edad Cretáceo (Formación Lutitas de Macanal) Figura 21, en donde el bloque cabalgante se compone de las unidades del lapso Devónico - Carbonífero. Esta falla ha sido analizada por [1] indicando geoformas e indicios de movimiento reciente (Neotectónica) en el escarpe de la falla, levantamiento de depósitos cuaternarios recientes, desplazamiento de cauces de ríos y valles de ríos alineados y lomos de falla siguiendo su ronda. Estos mismos autores estiman una magnitud de momento máxima de 7.6 asumiendo una ruptura total del plano de falla.

La longitud total de la falla es de 295,8km según [1] y una tasa de movimiento que varía entre 1 y 5mm al año. Según estos autores, dicha estimación de desplazamiento puede terminar desde medidas de depósitos de gravas aluviales cuaternarias deformados del trazo de falla.

El movimiento lateral es destrál. Esta cinemática de la falla y teniendo presente que el deslizamiento se encuentra sobre el labio de la falla, obliga a pensar que los desprendimientos de masa son fuertemente influenciados por acción tectónica en primera instancia, es decir, siendo los responsables de la trituration del macizo rocoso. En este caso se trata de la formación Lutitas de Macanal, las cuales de acuerdo a observaciones de campo in situ los cuerpos rocosos o las muestras de mano presentan fracturas en varias direcciones “moliendo” la roca y produciendo una meteorización mecánica por compresión, lo que da lugar a que el agua cuando llueve penetre en el macizo rocoso expandiendo los bloques y removiendo la masa suelta. El índice SL tomado en el drenaje que surca el deslizamiento, indica una alta movilidad tectónica, ya que el valor encontrado es muy alto.

8.2. Tipo de Suelo

El suelo es el producto de la interacción compleja de varios factores, entre ellos la roca madre, el tiempo, el clima, las plantas y los animales, y la topografía. Dado que los procesos de formación del suelo actúan desde la superficie hacia abajo, las variaciones de composición, textura, estructura y color evolucionan de manera gradual a las diversas profundidades. Existen muchas variaciones de un lugar a otro y de un período a otro entre los factores que controlan la formación del suelo. [22]

El suelo cubre la mayor parte de la superficie terrestre, puede definirse como una combinación de material mineral y orgánica, agua y aire.

Para identificar el tipo de suelo que pertenece a la zona estudiada se aplicó la metodología de conjuntos creada por científicos estadounidenses para clasificar los suelos conocido como la *Taxonomía del suelo* que hace énfasis en las propiedades físicas y químicas del perfil del suelo y se organiza según las características observables del suelo. Los nombres de las unidades de clasificación son combinaciones de sílabas, la mayoría de las cuales derivan del latín y el griego [22] dentro de los cuales se encuentra el tipo de suelo que caracteriza el área

local de los movimientos en masa presentados en la vereda Servitá como Entisoles. Figura 22



Figura 21. Tipo de suelo de la zona estudiada. Anexo 2

8.2.1. Entisoles

Suelos jóvenes con un desarrollo limitado que exhiben propiedades de la roca madre. La productividad oscila entre niveles muy altos para algunos suelos formados en depósitos fluviales recientes a niveles muy bajos para los que se forman en la arena voladora o en laderas rocosas (Tarbuck & Lutgens, 2005)

8.3. Geomorfología

La geomorfología actual del Departamento del Meta obedece en muy buena parte a la evolución geológica de la cordillera oriental y su interacción con el escudo Guayanés, toda

vez que los procesos de levantamiento y la consecuente erosión de aquella permiten explicar la sedimentación en los Llanos [23]. Figura 23

Sin embargo, para el área de estudio en Servita, se puede hacer la clasificación de la geomorfología como laderas denudadas, onduladas y erosivas, la cual es la propia de piedemonte llanero, en esta región, debido a que interaccionan los procesos tectónicos que hacen crecer el orógeno o cuerpo montañoso y la fuerte pluviosidad que se ha reportado para esta zona del país.

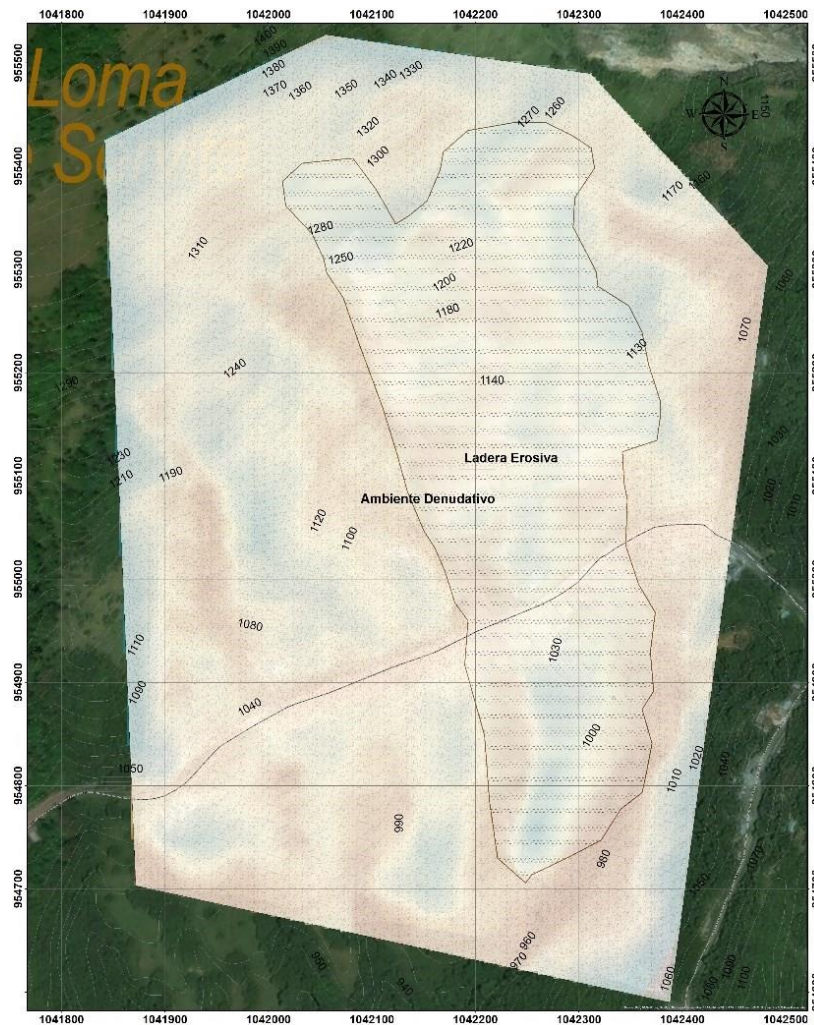


Figura 22. Geomorfología de la zona estudiada, Servitá. Anexo 3

8.4. Pendiente

El *gradiente de pendiente*, refleja el máximo cambio de los valores de elevación y puede ser usado para derivar varios parámetros nuevos, tales como los requeridos

para estudiar la erosión y deposición y humedad del suelo, la velocidad de flujo y muchos otros.

La modelación de la pendiente se efectuó a partir de un TIN generado en el software ARCGIS mediante las curvas de nivel, para luego, con base en este, generar una planta topográfica del área a estudiar, diferenciando las áreas con pendientes diferentes [24].

El predominio en el área de estudio oscila entre valores medio y alto, con áreas entre 153857,526 y 142619,85 respectivamente como se evidencia en la Tabla 3, para pendientes con porcentajes de inclinación superiores al 30%, reafirmando así la incidencia que tiene este criterio en los movimientos en masa presentados en la Vereda Servitá justo como se evidencia en la Figura 24, asociando así las zonas susceptibles a movimiento en masa.

Tabla 2. Clasificación de pendientes. [12]

Clasificación	Pendiente (ángulo de inclinación)
Muy baja	0 a 5 % (0 a 8.5 grados)
Baja	15 a 30 % (8.5 a 16.7 grados)
Mediana	30 a 50 % (16.7 a 26.6 grados)
Alta	50 a 100% (26,6 a 45 grados)
Muy alta	Más del 100% (más de 45 grados)

Elaboración propia

Tabla 3. Áreas de pendientes del área estudiada. Fuente: Elaboración propia.

Símbolo	Pendiente	Área m2	Porcentaje inclinación	Angulo de inclinación
	Muy Baja	29274,552	0 - 15%	0° - 8.5°
	Baja	93513,250	15 - 30%	8.5 - 16.7
	Media	153857,526	30 - 50%	16.7 – 26.6
	Alta	142619,856	50 - 100%	26.6 – 45°
	Muy Alta	65420,266	<100%	<45°

Elaboración propia

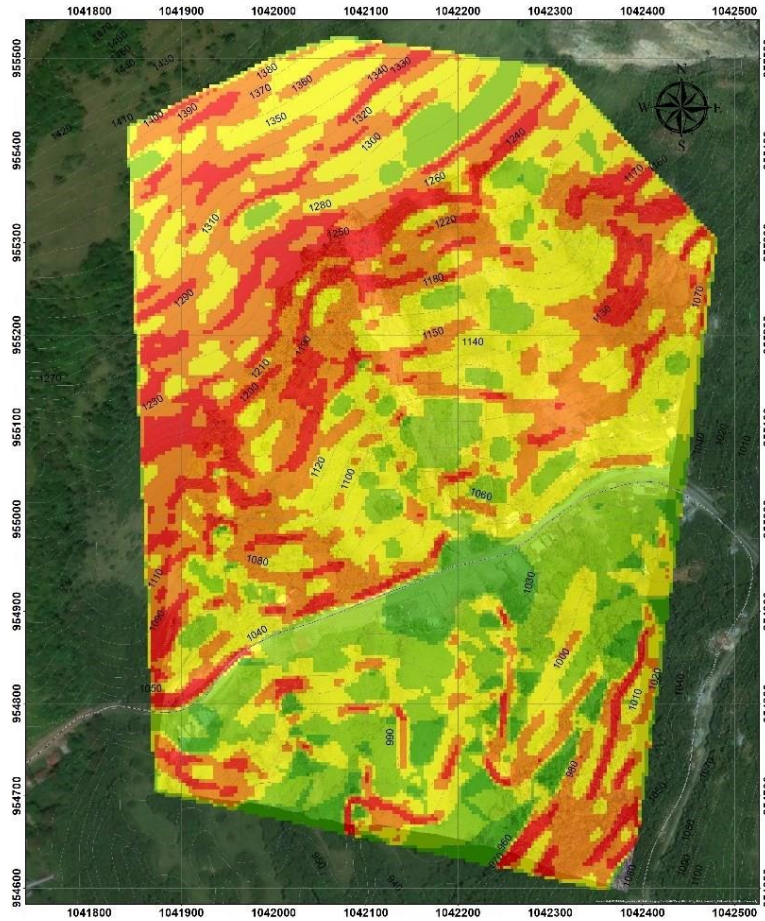


Figura 23. Mapa de pendientes de la zona estudiada, Servitá. Fuente: Elaboración propia. Anexo 4

8.5. Climatología

La descripción de la actividad climática se efectúa a través del análisis de los datos proporcionados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), de la estación Servitá desde el año 2010 hasta el 2017. Con estos datos se hace una comparación entre deterioro de la región estudiada y los picos de precipitación diaria, mensual y anual. Además, se realiza un tipo de interpolación de estos datos con imágenes satelitales obtenidas de Google Earth©.

Precipitaciones en la zona de estudio:

Como se puede observar en la Figura 25, la zona de estudio está dentro del piedemonte llanero, el cual se caracteriza por sus altas precipitaciones anuales, las cuales varían de los 5000 a los 9000 mm

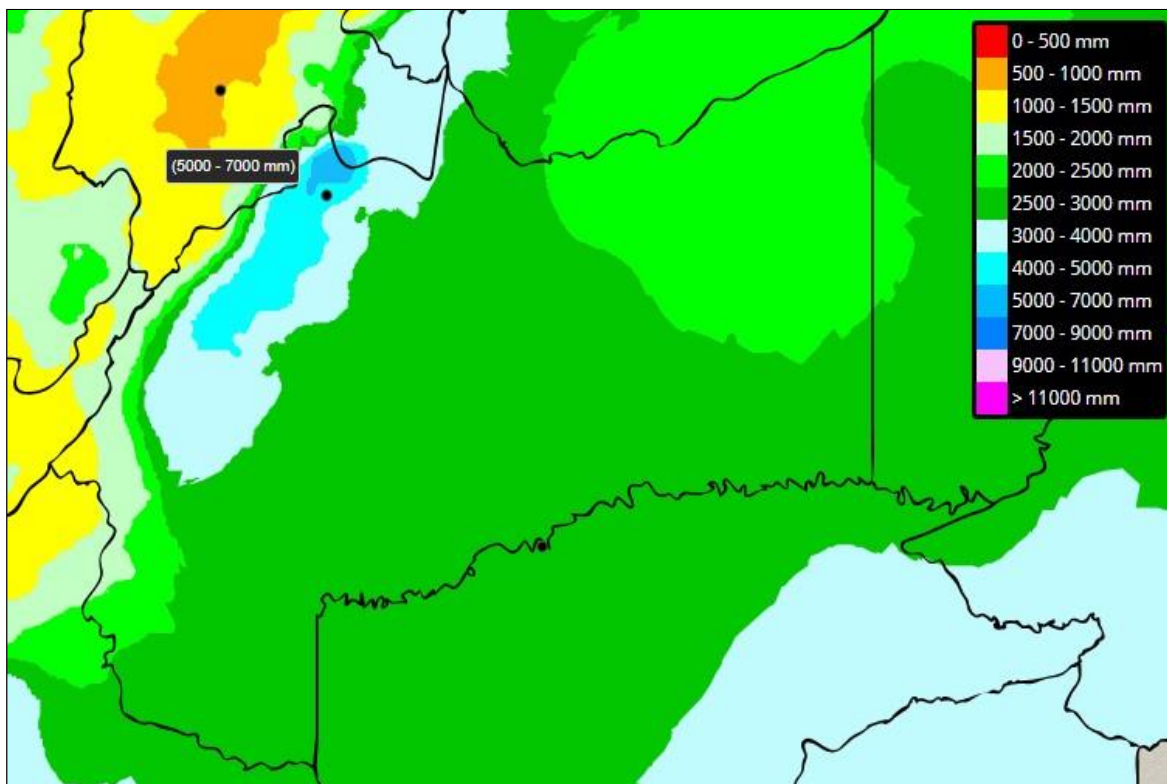


Figura 24. Precipitaciones en Colombia. Fuente: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>

9. ANÁLISIS DE RESULTADOS

9.1. Cobertura Vegetal y uso del suelo

La cobertura vegetal y los usos del suelo determinan el funcionamiento de los ecosistemas terrestres: afectan directamente su biodiversidad, contribuyen a cambios climáticos locales, regionales y globales y son las fuentes primarias de la degradación de los suelos [25]

La transformación perceptible y generalizable de la vegetación o los usos antrópicos por medio de un intervalo de tiempo en determinada porción de terreno es reconocida como el análisis de cambio en la cobertura y uso de suelo (ACCUS) [25] siendo así un aspecto positivo en el proceso de evaluación y caracterización de áreas locales, regionales y nacionales para los esquemas o planes de ordenamiento territorial.

En la actualidad los análisis de cambio de cobertura y uso de suelo es considerado el procedimiento más confiable para medir la deforestación, alteración y transformación de los usos del suelo y su dinámica a través del tiempo [26]

El modelo metodológico utilizado para la elaboración del mapa de cobertura vegetal y uso del suelo es la adaptación para Colombia del Corine Land Cover, complementada a su vez con la Leyenda nacional de coberturas de Tierra propuestas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, que consiste en la realización de un inventario homogéneo de la cobertura de la superficie de la tierra a partir de la interpretación visual de imágenes satelitales aisladas por computador y la generación de una base de datos geográfica [27]

Con base en esto y en la clasificación de uso de suelos realizado por la alcaldía se estableció que es un área agrícola, con pastos arbolados y tejido urbano discontinuo con red vial nacional, sin embargo, en la visita a campo se pudo identificar también labores agropecuarias y de pan coger. Figura 26.



Figura 25. Cobertura vegetal y uso del suelo en la zona estudiada, vereda Servitá.. Fuente: Elaboración propia. Anexo 5

9.2. Caracterización de la remoción en masa de la zona vereda Servita

En este trabajo se definen los procesos de procedencia geológica generadores de desastres que deben ser considerados en conjunto con sus elementos causales procesos de remoción

en masa de una ladera para los cuales se aplica la clasificación de [7]. La cual está basada en el tipo de material que constituye la ladera susceptible a remoción, ya sea de roca, escombros, sedimentos (constituidos por lodos, arenas, suelos orgánicos o la mezcla de los anteriores ya sean secos, saturados o altamente saturados por agua) y con velocidades que oscilan entre lentas (30cm cada 5 años) a extremadamente rápidos (3 m por segundo).

En el accionar de los fenómenos de remoción de masa se siguen aquí, los criterios de [28], con respecto a las condiciones geológicas del macizo rocoso y [3] para las condiciones climáticas, con las cuales se detonan los flujos, avenidas torrenciales y las avalanchas.

De acuerdo a la verificación en visita de campo más el análisis a partir de imágenes con sensores remotos se encontró que se trata de un movimiento en masa complejo ya que se identificó caída de roca en la parte superior, cerca de la corona del movimiento en masa principal junto con flujo de escombros y arrastre de material. El material identificado son escombros compuestos de bloques, gravas, arenas, tierra y restos de materia vegetal como troncos, pastos, entre otros.

Normalmente el movimiento se inicia de manera repentina en los momentos de fuerte precipitación, detonando los flujos de escombros principalmente, eventualmente caída de rocas obstruyendo la carretera y precipitándose hacia la parte inferior donde discurre la quebrada Servitá

El movimiento de arrastre (creep) ocupa la mayor área y/o volumen de la zona afectada, con una velocidad aproximada de 5m al año. Este tipo de movimiento es el que mayor peligro genera a las comunidades asentadas en la vereda Servita, debido a que el tamaño de la masa removida prácticamente abarca todas las viviendas e infraestructura encontrada en el área. De acuerdo a lo anterior el pronóstico que se hace tanto frente a la carretera como a esos asentamientos es el de amenaza muy alta, ya que el 100% de la población es vulnerable frente a un eventual proceso de remoción de masa que podría presentarse cuando todo el material que se encuentre en esta fase de arrastre inicie un movimiento rápido que podría estimarse como un gran deslizamiento del tipo planar o traslacional, porque el macizo afectado está compuesto en un gran porcentaje, casi que en su totalidad, por roca, acompañada de escombros.

Los flujos de escombros en la medida que se están detonando junto con la caída de roca, ayudan a que la gran masa que está arrastrándose cada vez pierda estabilidad, lo que conllevará a un movimiento mayor generalizado de esta última. Figura 27.



Figura 26. Clasificación de la remoción en masa en la zona de estudio, Servitá. Anexo 6

9.3. Climatología

9.3.1. Precipitación anual

De acuerdo con los valores totales anuales de precipitación Figura 28, se presentó un notable incremento del 2010 al 2012, pues pasó de 6158,6 mm a 7242,8 mm, respectivamente. De los años 2013 a 2015, las precipitaciones fueron decrecientes, con 6354,3 mm a 5442,7 mm, el valor del 2015 es gracias al aumento de la temperatura debido al calentamiento de los vientos del Pacífico ecuatorial, más conocido como Fenómeno del Niño. En el año 2016, las precipitaciones volvieron a aumentar aproximadamente en 2000 mm, llegando a 7303,1 mm, y en el año 2017, se presentaron los niveles más altos de precipitación, respecto a los años tomados, con un total de 7585,1 mm, estas debido al fenómeno de la niña que tuvo mayor fuerza en los meses de mayo y junio.



Figura 27. Precipitación total anual 2010-2017. Fuente: IDEAM.

Teniendo en cuenta que los picos más altos de precipitación se presentan en los años 2012 y 2017, y que el más bajo se presenta en el año 2015, serán analizados con más detalle los datos de estos años y, aún con mayor énfasis, los datos del 2017, dado que en éste año ocurrió la emergencia manifiesta.

Como punto de partida para comparar la relación del terreno con respecto a las precipitaciones que ha tenido en los últimos años el sector de Servitá, se toma una imagen de Google Earth del año 2005 (Figura 29), en donde evidencia que la zona no tiene ningún daño ni se presenta algún fenómeno de remoción en masa.

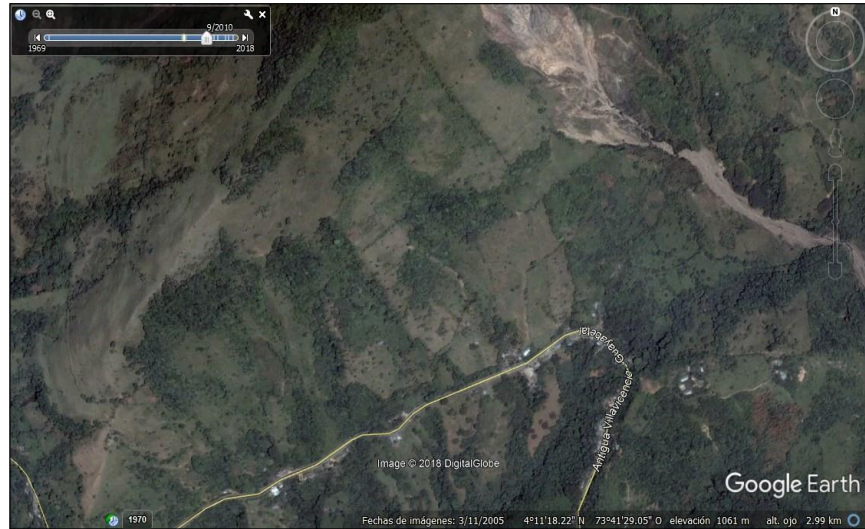


Figura 28. Imagen satelital de la zona estudiada en el 2005. Fuente: Google Earth©

9.3.1.1. Año 2012:

Se puede evidenciar dentro del círculo rojo erosión en el terreno, la cual coincide con el incremento de las lluvias en éste año.

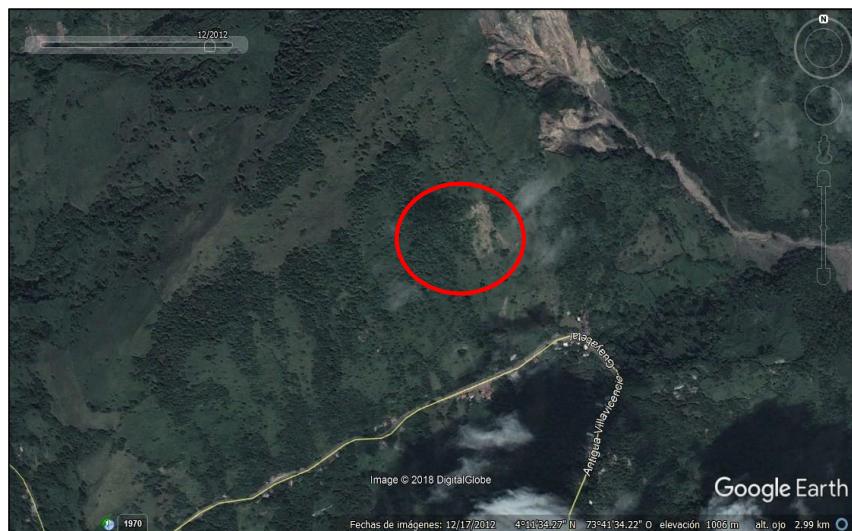


Figura 29. Imagen satelital de la zona estudiada en el 2012. Fuente: Google Earth©

De acuerdo a los valores totales de precipitación registrados (Figura 31) para el año 2012, se muestran tres tipos de comportamientos a lo largo del año; durante los primeros tres meses es notable la sequía pues se presentan los valores más bajos de precipitación (20 - 220 mm), después, de marzo a julio, se presentan los picos más altos (750 a 970 mm) y en enero, Febrero, finalmente, en el resto del año, se mantienen los valores de precipitación entre 470 y 560 mm.



Figura 30. Valores de precipitación en el año 2012. Fuente: IDEAM

9.3.1.2. Año 2015:

Para este año se presenta un comportamiento constante respecto a las lluvias, donde la mayoría se mantienen por debajo de los 550 mm y sólo en los meses de abril y julio, las lluvias sobrepasan los 700 mm. Puede que, de alguna manera, la resequedad causada por la ola de calor de éste año, haya influido en el terreno y éste haya quedado debilitado tanto, que no haya podido soportar las lluvias que vinieron en los años posteriores. Figura 32.

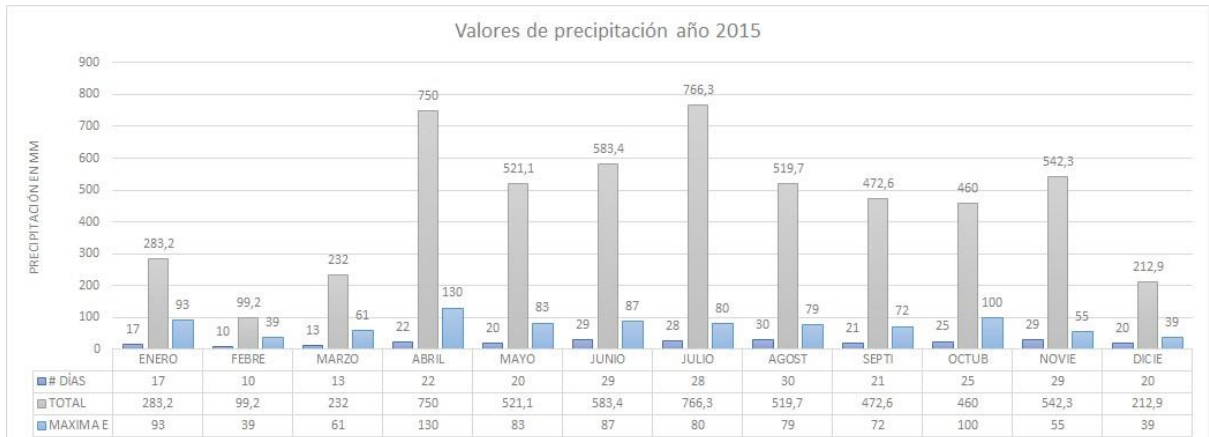


Figura 31. Valores de precipitación del año 2015. Fuente: IDEAM.

9.3.1.3. Año 2017:

Para este año se hace necesaria una descripción más detallada del comportamiento de las precipitaciones mensualmente, dado a que ha sido el año, hasta el momento, en donde se han presentado las precipitaciones más altas y que, gracias a estas, se dio origen a la problemática hoy analizada con esta tesis.

Todo tiene origen con el cambio que se presenta entre Abril y Mayo, donde las precipitaciones aumentan en más de 700 mm, llegando a la máxima precipitación del año que corresponde a 1238 mm, las cuales conllevaron a que ocurrieran múltiples deslizamientos a lo largo de la vía durante ese mes; posteriormente, en Junio, continuaron las altas precipitaciones (1084 mm), pero, adicional a esto, en éste mes fueron más los días de lluvia y la noche del 22 de Junio de 2017, se presentó el fenómeno de remoción en masa que dejó varias pérdidas materiales y ocasionó el cierre de la vía por varios días. Además, según el INVIAS, se llegaron a remover alrededor de 25000 m³ de material en la vía, después de la emergencia manifiesta.

Después del aumento tan radical de las lluvias, en el mes de Julio volvieron a ser moderadas, con 710,3 mm y así fueron bajando hasta el mes de septiembre. De nuevo, las precipitaciones aumentaron en octubre y noviembre, ocasionando de nuevo deslizamientos, pero ya no tan graves como los ocurridos en junio. Figura 33.



Figura 32. Valores de precipitación en el año 2017. Fuente: IDEAM.

9.4. Soluciones de ingeniería

Teniendo en cuenta:

Zona de falla: La falla Servitá, que se encuentra a alrededor de 500 metros paralelamente de la zona de estudio de la vía antigua, está en constante movimiento a causa del proceso de subducción del borde oriental de la placa Nazca bajo la placa Sudamericana, lo cual provoca que la zona sea geológicamente inestable en alto grado.

Influencia de la falla: Según (Pulido & Gómez, 2001), por la zona de falla y al norte de la misma, se alcanzan los 200 m de influencia, por lo tanto, se pueden encontrar estratos triturados alrededor de la misma que, por efectos de la gravedad, producen continuos deslizamientos de masa rocosa, los cuales, sumados a las precipitaciones anuales en el piedemonte llanero, pueden llegar a superar los 4000 mm, generando altos niveles de infiltración en el terreno, provocando que ocurran constantes deslizamientos durante la época de invierno, que se extiende de Abril a Noviembre, así como los cierres de la vía por lo mismo.

Es menester resaltar las características altamente inestables del sector para entrar a analizar el tipo de solución que se le podría dar a esta problemática; en primera medida, *grosso modo*, se contemplan los taludes o muros mecánicamente estabilizados, pero este tipo de estabilización no sería ni total, ni definitiva, sino relativa y en ciertas condiciones, de manera provisional. (Suárez, 2009). Por otro lado, esta opción se complica aún más por los materiales predominantes de la zona, tales como las lutitas o arcillolitas, derivadas en nuestro caso de

la Formación Lutitas de Pipiral. Este material es uno de los más complejos de manejar desde la estabilidad de taludes, pues debido a su bajo grado de solidificación y baja resistencia al cortante, tienden a desintegrarse fácilmente.

Asimismo, las arcillolitas, que son lutitas con alto contenido de arcilla, son muy físis y susceptibles a deslizamientos. (Suárez, 1998)

Como se ha descrito, la zona analizada, tanto por sus condiciones geológicas, y climatológicas, tiene un alto nivel de amenaza que, si no se toman las medidas necesarias de prevención, elusión, control o estabilización, dependiendo de lo que requiera éste deslizamiento, las consecuencias podrían agravarse cada día más.

Por lo tanto, a continuación, se evaluarán las diferentes alternativas de solución a esta problemática:

9.4.1. Métodos para disminuir o eliminar el riesgo

9.4.1.1.Prevenición

El riesgo es inminente y en éste sector ya se han presentado diferentes deslizamientos que tienen su inicio el 26 de junio de 2017; tanto los residentes del sector como los vehículos que pasan por esta vía han sido afectados, es por este motivo que la prevención ya no tiene razón de ser para este caso. Por lo tanto, sólo queda esperar que las autoridades municipales intervengan para ayudar a estas personas, ya que, de acuerdo al principio de protección del Artículo 3 de la Ley 1523 de 2012, los colombianos deben ser protegidos por las autoridades frente a desastres o fenómenos peligrosos que atenten contra su integridad. Sin embargo, esto sólo se puede hacer si las personas que residen en Servitá permiten la intervención del estado y, además, demuestren que son legalmente propietarios de los terrenos que están en riesgo o afectados.

9.4.1.2.Elusión de la amenaza

De esta manera, se puede evitar que la vía, la cual está en riesgo constante, quede expuesta al deslizamiento; una alternativa sería la remoción total o parcial del deslizamiento, sin embargo, como el deslizamiento empieza prácticamente desde la corona de la montaña, y el tramo de vía afectado es de alrededor de 271 metros, la magnitud del material a remover impide que esta alternativa sea viable, ya que, además de salir muy costoso, en el proceso de

excavación y remoción del material inestable, se activaría el deslizamiento de nuevo, poniendo en riesgo no solo el tramo de vía afectado sino a la comunidad que se asienta en su pie y que corresponde a la vereda Servitá. Por lo tanto, la opción más sensata, sería la construcción de un viaducto.

Opción 1:



Figura 33. Opción 1 - Viaducto. Fuente: Google Earth© y Elaboración propia.

Longitud: 780 metros aproximadamente, Y1:1069, Y2: 1031 m=4.8%

En ésta opción, la estabilidad del puente podría llegar a verse afectada por estar ubicado ortogonalmente a la falla Servitá; además, la distancia del puente y la longitud de los pilotes, que rondaría de los 50 a los 100 m aproximadamente, haría que los costos fueran excesivos, y no se justificaría.

Opción 2:



Figura 34. Opción 2 - Viaducto paralelo a la falla. Fuente: Google Earth© y Elaboración propia.

Longitud: 610 metros aproximadamente, Y1: 1039, Y2: 1031, $m=1.3\%$

Se trata de un viaducto paralelo al tramo de vía afectado por el deslizamiento; esta opción permitiría que la movilidad no se afecte en lo absoluto, respecto al deslizamiento, quedaría totalmente apartado del material inestable de la montaña. Sin embargo, sus pilotes, además de soportar su propio peso y el peso del viaducto, también tendrían que soportar de alguna forma el material que caiga de la parte superior de la montaña. Aunque, teniendo en cuenta que el tramo de vía antigua continuará allí, éste serviría de mitigador de la amenaza para la infraestructura.

Además de que éste viaducto sería más corto que la *opción 1*, la altura de sus pilotes oscilaría entre 20 y 45 metros aproximadamente, reduciendo los costos considerablemente respecto a esa opción. Por otro lado, el ángulo de curvatura del K 0+00 del viaducto, sería demasiado alto y, a causa de esto, la movilidad de los vehículos de carga larga y ancha se vería

perjudicada considerablemente en el momento de tomar la curva, además que aumentaría el grado de accidentalidad.

9.4.2. Métodos de estructuras de control de movimiento

A pesar de que la amenaza es inminente y que ya ha causado muchos daños tanto a la vía como a la población civil, con éste tipo de estructuras se puede mitigar el riesgo, pues la caída de detritos y suelo seguirá ocurriendo, sólo que con esto habrá mayor control.

Como se observa en la Figura 36, es un flujo de escombros donde las rocas son de gran tamaño y hay restos de vegetación en lo que quedó después de las lluvias torrenciales del 22 de junio de 2017.



Figura 35. Daños causados por el deslizamiento del 22 de Junio de 2017 en Servitá. Fuente: Camioneros del Meta.

En este caso, teniendo en cuenta el comportamiento y tipo de deslizamiento, una caída de detritos que se activa, principalmente, con las precipitaciones exageradas del sector, se podría usar un *slit dam* o *Sabo dams*, (Figura 37).

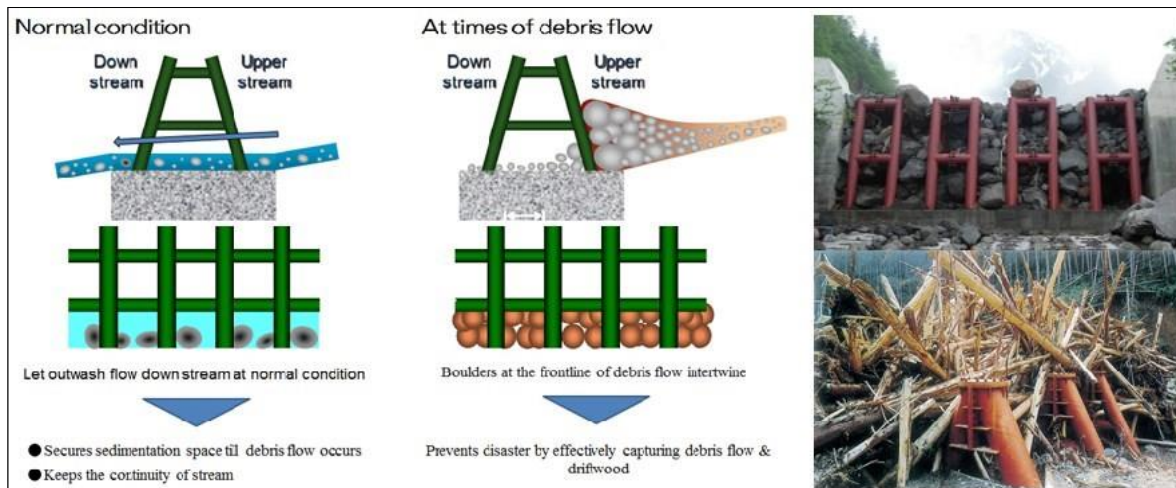


Figura 36. Steel slit dam. Fuente: <https://www.bosai-jp.org/en/solution/detail/26/search>

Se trata de unos tamices de gran tamaño, capaces de retener todo el flujo de escombros que se genera en un evento torrencial, tales como rocas de la ladera de la montaña, escombros leñosos, y cualquier otro elemento arrastrado tras las lluvias intensas. Así mismo, dejan pasar los elementos más finos, tales como el agua, limos, arcillas y cualquier otro elemento que esté inmerso en el fango. Éste sistema se creó en Japón con el fin de mitigar el impacto de las avalanchas que venían afectando a este país, y ha sido la empresa International Sabo Network quien se ha encargado de llevar este sistema a otros países, tales como Venezuela, Honduras, Francia, Filipinas, entre otros. Siendo Venezuela un caso especial, debido a los desastres que han ocurrido en el Estado de Vargas, contiguo al Mar Caribe, desde los años 40; estos han causado graves daños a la población e incalculables pérdidas materiales. Desde 1999 la empresa ha intervenido allí construyendo presas que han logrado mitigar la amenaza.

Con este sistema se logra mitigar el impacto del desastre y, tras la ocurrencia del mismo, las entidades competentes se encargan de remover el material que haya quedado retenido detrás de esta *barrera*. En países como Venezuela se usó a mínima escala, sin embargo, siguen teniendo problemas pues las personas siguen usando tierras con altas pendientes para agricultura o viviendas, lo cual aumenta la erosión del suelo.

De acuerdo con las características de los fenómenos de remoción en masa que se presentan en la zona de estudio, especialmente el que sea un flujo de detritos, como se había

mencionado anteriormente, se podría adaptar esta estructura en las tres zonas más críticas del deslizamiento, con relación a la carretera: Figura 38.

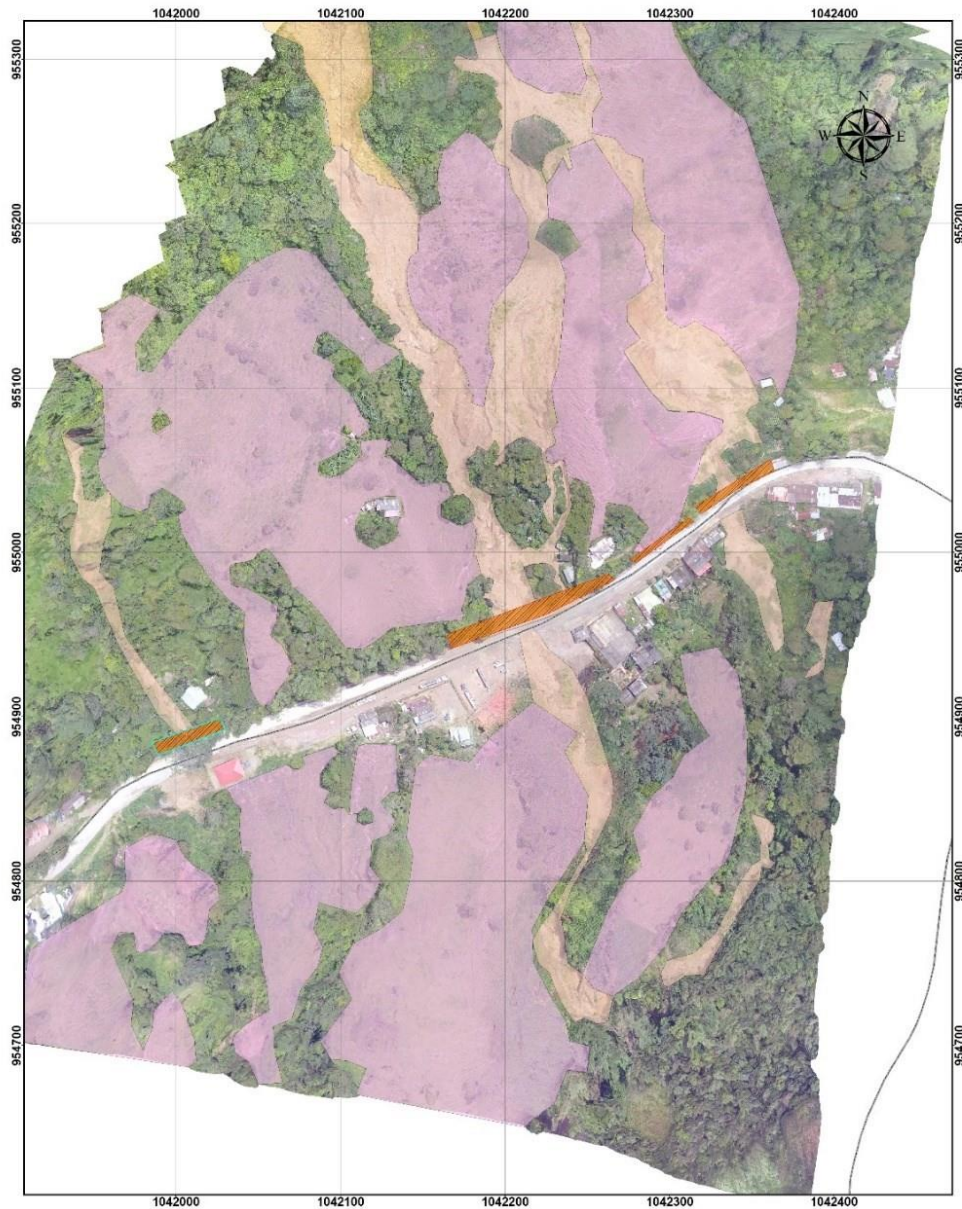


Figura 37. Tentativa de lugares en donde colocar el Steel slit dam. Fuente: Elaboración propia.

Esta estructura es la más apta para esta problemática, a pesar de que se deba hacer mantenimiento constante, protegería a la vía y evitaría daños mayores a la población asentada en esta zona. Sin embargo, alrededor de un kilómetro después de la zona de riesgo y amenaza, se encuentra otro deslizamiento: Figura 39.



Figura 38. Zona afectada por deslizamiento en vía antigua Bogotá - Villavicencio. Fuente: Elaboración propia.

No sólo después de la zona estudiada, sino antes y durante toda la vía antigua desde el sector de Buena Vista hasta que la vía antigua se vuelve a conectar con la nueva en Pipiral, se presentan diferentes tipos de fenómenos de remoción en masa que ponen en peligro a todos quienes residen y pasan por esta vía. Asimismo, se presentan varios hundimientos a lo largo de la vía gracias a la inestabilidad geológica del piedemonte llanero.

Finalmente, teniendo en consideración que gran parte del macizo rocoso se está desprendiendo debido a la alta meteorización del mismo y sumándole las demás características que ya se han descrito anteriormente, cualquier solución de ingeniería sería muy costosa por cuestiones de construcción y mantenimiento, además que podría quedar inservible en muy poco tiempo.

9.5. Pronóstico

De acuerdo a lo que se observa en la ortofoto a detalle, prácticamente el 80% del área fotografiada está en un proceso de arrastre (creep). Se estima que todo lo que está en ese proceso de arrastre, serán las masas que, eventualmente, se deslizarán o caerán. Es decir, el área que corresponde al creep más el 20% restante que corresponde a los otros dos tipos de movimiento en masa, eventualmente, en el transcurso de los próximos años (entre dos y cinco años aproximadamente), bastará con un pico alto de precipitación para mover toda esta zona. Eso incluye el tramo de carretera y la parte baja del deslizamiento, que está por debajo de la misma, lo cual producirá un represamiento en la parte alta de la cuenca de la Quebrada Servitá.

Con base en el análisis realizado gracias a la ortofoto, es posible afirmar que aproximadamente el 80% del área fotografiada está en un proceso de arrastre (creep) que permanece en constante movimiento, viéndose activado por las fuertes precipitaciones y las vibraciones que generan los vehículos a su paso y las actividades de construcción aledañas al sector, y siendo el área de un volumen aproximado de 4349387,2 m³; podría decirse que es muy difícil contenerlo en su totalidad, pues no es de olvidar tampoco el grado de erosión en que se encuentra el material. El 20% restante, corresponde a los otros tipos de movimientos en masa (Caída de roca y flujo) descritos anteriormente, y los cuales eventualmente en un lapso cercano de 2 a 5 años aproximadamente se verán desplazados, tanto el área superior de la carretera como el área inferior, trayendo consigo represamiento en la parte alta de la cuenca de la Quebrada Servitá.

Capítulo 5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

10. CONCLUSIONES

Con el mapa de amenaza que se genere a partir de este proyecto, se verá beneficiada la alcaldía del municipio de Villavicencio, ya que tendrá una herramienta que le aportará al Plan de Ordenamiento Territorial, pues podrán verificar qué zonas de Servitá son las más vulnerables a los deslizamientos de la montaña, evitando que haya más asentamientos en el sector.

En cuestiones de movilidad y tránsito de la zona, si se aplican las soluciones de ingeniería, como taludes, muros de contención o geomallas, entre otros, que se propongan para esta zona, se va a evitar que vuelvan a haber represamientos en la vía o pérdidas humanas por el desprendimiento súbito del terreno.

Es probable que el factor climático hidrológico sea el que más haya influido en el desprendimiento del terreno el día 22 de junio de 2017, dado a que en la fecha la pluviosidad en la zona aumentó considerablemente, y la noche en que sucedieron los hechos, se presentó la lluvia más fuerte del año. Sin embargo, no se descarta la idea de que los trabajos aledaños con respecto a la construcción de la doble calzada Bogotá – Villavicencio, sean causales en la desestabilización del terreno, dado a que las máquinas para la construcción de túneles o remoción de material impactan considerablemente el suelo.

El proceso de subducción de la placa Nazca bajo la placa Suramericana, ha provocado el constante, pero milimétrico, crecimiento de la montaña, lo cual ha ocasionado el desprendimiento de la parte superior de la misma. Pero como se dijo anteriormente, han sido las lluvias el detonante principal de estos fenómenos de remoción en masa.

11. TRABAJOS FUTUROS

De haber existido un convenio con el INVÍAS o Coviandes, se hubiese obtenido más información de todos los deslizamientos que han ocurrido en la zona en los últimos años, y los resultados habrían sido más precisos. A pesar de esto, se logró compilar gran información que permitió el desarrollo del proyecto.

Sin embargo, para profundizar más en esta investigación se podría realizar una caracterización del terreno de acuerdo con su material, composición, y demás, con el fin de obtener datos más precisos para las soluciones de ingeniería a realizar; para lo cual se necesitaría muestreo in situ y pruebas de laboratorio.

También se podría buscar otro tipo de ingeniería para la estabilización de taludes, como plantas especiales, geomallas, entre otros; que no afectarían tanto al medio ambiente.

12. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. Paris, M. Richard y K. Haller, Database and map of quaternary faults and folds of Colombia and its offshore regions, USGS, 2000.
- [2] G. B. M., de *Caminos Reales de Colombia.*, Bogotá, Los llanos de San Juan y San Martín. En P. Moreno de Angel, J. O. Melo., A. Sierra Restrepo., (Eds.), 1995.
- [3] R. Huggett, *Fundamental of Geomorphology*, London and New York: Routledge, 2007.
- [4] G. Duque, *Manual de geología para ingenieros*, Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- [5] SGC, de *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa*, Bogotá, Servicio Geológico Colombiano, 2015, p. 17.
- [6] Servicio Geológico Colombiano (SGC), Documento metodológico para la zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, Escala 1:100.000, Bogotá, 2013.
- [7] Cruden.D.M y D. Varnes, *Landslide Types and Processes*, special report, transportation research board, Alberta: National Academy of Science, 1996.
- [8] Varnes, «Landslide classification,» 1978. [En línea]. Available: http://www.geology.cz/projekt681900/vyukove-materialy/2_Varnes_landslide_classification.pdf.
- [9] PMA-GCA, «Proyecto Multinacional Andino-Geociencias para las Comunidades Andinas,» de *Conozcamos los peligros geológicos en la región andina.*, Publicación Geológica Multinacional 5, 2007.
- [10] J. Sánz, *Mecánica de suelos*, Barcelona: Editores técnicos asociados, 1975.
- [11] G. Chicangana, *Estudio de sistema de fallas de Romeral a partir de la una caracterización sismotectónica*, Bogotá: Facultad de ciencias, Universidad Santo Tomás, 2005.
- [12] J. S. Díaz, de *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, Bucaramanga, Ingeniería de suelos Ltda, 1998.
- [13] Instituto tecnológico geominero de España, de *Reducción de riesgos geológicos en España*, Madrid, DIRDN, 1995.
- [14] G. Campero, «Estabilización de taludes,» 2011. [En línea]. [Último acceso: 29 Octubre 2017].

- [15] G. Shilong, «Causes and Stability Analysis of Landslide in road emergency rescue,» de *8th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, China, 2015.
- [16] A. T. A. B. J. W. F. G. F. A. M. R. Jalal Samia, «Characterization and quantification of path dependency in landslide susceptibility,» Elsevier, Italia, 2017.
- [17] I. Acosta, «Impacto de cambio climático en la remoción en masa del municipio de Villavicencio,» Cap&Cual, Villavicencio, 2014.
- [18] A. Ramos y A. Alfaro, *Fuentes sismogénicas y deslizamientos en Villavicencio para la microzonificación sísmica*, Villavicencio, 2000.
- [19] E. Keller y N. Pinter, *Active Tectonics, Earthquakes, uplift and landscape*, 1996.
- [20] D. Burbank y R. Anderson, *Tectonic geomorphology*, 2011.
- [21] O. Pulido, L. Gomez y P. Marín, «Geología de la plancha 266 Villavicencio,» de *Ingeominas*, Bogotá.
- [22] E. J. Tarbuck y F. K. Lutgens, *Ciencias de la tierra*, Madrid: Pearson Educación S.A, 2005.
- [23] A. J. R. Parra, «Geomorfología,» de *MAPA GEOLOGICO DEL DEPARTAMENTO*, Bogotá, INGEOMINAS, 2001, pp. 18, 19.
- [24] J. Suárez, «Zonificación de susceptibilidad, amenaza y riesgo,» de *Deslizamientos y estabilidad en zonas tropicales*, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander , 1998, p. 536.
- [25] M. Mendoza, A. Velázquez, A. Larrazábal y A. Toledo, «La cobertura vegetal y los cambios de uso del suelo,» de *Atlas fisicogeográfico de la cuenca del Tepalcatepec* , Michoacán, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010, p. 28.
- [26] M. Rounsevell, J. Annetss, E. Audsley, T. Mayr y I. Reginster, «Agriculture, ecosystems and environment,» *Encyclopedia of Food Security and Sustainability*, vol. 95, pp. p.465-479, 2003.
- [27] IDEAM, Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, *Leyenda nacional de cobertura de las tierras*, Bogotá D.C: Scripto Ltda, 2010.
- [28] R. Fell y D. Stapledon, *Landslides and geologic environments*, Londres: Universidad de Cambridge , 2013.
- [29] R. J. Hugget, «Fundamentals of Geomorphology,» Abingdon Oxon, Routledge, Taylor & Francis Group, 2007.

13. ANEXOS

- Anexo 1: Mapa de Geología
- Anexo 2: Mapa de Tipo de suelo
- Anexo 3: Mapa de Geomorfología
- Anexo 4: Mapa de Pendientes
- Anexo 5: Mapa de Cobertura Vegetal y Uso de suelo
- Anexo 6: Mapa de movimientos en masa
- Anexo 7: Cartografía base