

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Application of the flow accumulation technique, making use of geographic information systems; on slopes adjacent to the Bogotá – Villavicencio road that have failed and also those that have already been recovered, in order to determine new points where new landslides may occur.

Alejandra Echeverria Beltrán

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

2023

Aplicación de la técnica de flujo de acumulación; haciendo uso de sistemas de información geográfica; en taludes adyacentes a la vía Bogotá – Villavicencio que hayan fallado y también los ya recuperados, con el fin de determinar nuevos puntos en los que se puedan presentar nuevos deslizamientos.

Alejandra Echeverria Beltrán

Trabajo final presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería, Infraestructura y Sistemas de Transporte.

Director:

Msc, Franc Montoya Callejas

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Civil

Manizales, Colombia

2023

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	11
1.1	Planteamiento del Problema.....	13
1.2	Justificación.....	16
1.3	Alcance.....	18
2.	Objetivos.....	19
2.1	Objetivo General.....	19
2.2	Objetivos Específicos.....	19
3.	Marco de Referencia.....	20
3.1	Marco Teórico.....	20
3.2	Marco conceptual.....	37
3.3	Estado del Arte.....	39
4.	Metodología.....	45
4.1	Identificación de la Problemática.....	46
4.2	Seleccionar el Tramo Vial.....	46
4.3	Delimitar Áreas con Posible Afectación que Intersecan con la Vía en Estudio.....	47
4.4	Determinación del Punto más Crítico de la Vía en Observación.....	49
4.5	Ráster de Elevación.....	50
4.6	Georreferenciación y Uso de Ortofoto.....	51
4.7	Procesamiento de la Información en CIENTIFICO.....	52
4.8	Aplicación de la Técnica de Acumulación en SAGA.....	54

4.9	Análisis del Flujo de Acumulación en QGIS.....	58
5.	Desarrollo.....	75
5.1	Sitio 1. (4°27'21.08"N; 74° 3'25.71"O).....	76
5.2	Sitio 4. (4°25'36.97"N; 73°59'42.55"O).....	80
5.3	Sitio 5. (4°2 5'14.58"N; 73°59'6.16"O.....	83
5.4	Sitio 6. (4°25'29.22"N; 73°58'17.07"O).....	87
5.5	Sitio 9. (4°22'22.58"N; 73°54'31.81"O).....	92
5.6	Sitio 12. (4°19'23.09"N; 73°52'14.67"O).....	95
5.7	Sitio 15. (4°17'25.60"N; 73°50'55.79"O).....	98
5.8	Sitio 19. (4°14'42.90"N; 73°49'27.00"O).....	101
5.9	Sitio 21, punto de calibración. (4°13'46.66"N; 73°48'43.94"O).....	103
5.10	Sitio 23. (4°12'9.95"N; 73°48'7.77"O).....	108
5.11	Sitio 25. (4°12'34.32"N; 73°46'43.19"O).....	112
5.12	Sitio 27. (4°12'25.13"N; 73°45'22.27"O).....	114
5.13	Sitio 28. (4°12'25.13"N; 73°45'22.27"O).....	117
6.	Análisis de resultados y discusión.....	120
6.1	Sitio 1.....	124
6.2	Sitio 4.....	124
6.3	Sitio 5.....	125
6.4	Sitio 6.....	126
6.5	Sitio 9.....	127

6.6	Sitio 12.....	127
6.7	Sitio 15.....	128
6.8	Sitio 19.....	130
6.9	Sitio 21.....	131
6.10	Sitio 23.....	136
6.11	Sitio 25.....	136
6.12	Sitio 27.....	140
6.13	Sitio 28.....	141
7.	Conclusiones.....	144
8.	Referencias.....	146

Lista de Figuras.

Figura 3.1.1 <i>Nomenclatura de taludes y laderas.</i>	23
Figura 3.1.2 <i>Nomenclatura de un deslizamiento.</i>	24
Figura 3.1.3. <i>Dirección y valor del flujo de acumulación.</i>	33
Figura 3.1.4. <i>Vista de perfil de un sumidero y un pico antes y después de ejecutar Relleno</i>	35
Figura 4.2.1 <i>Ruta 40 – Mega vía Buenaventura – Puertocarreño.</i>	47
Figura 4.3.1 <i>Veintiocho UGI identificadas en tramo de vía Bogotá - Villavicencio</i>	48
Figura 4.3.2 <i>Inicio – Fin, tramo de vía en estudio</i>	49
Figura 4.6.1 <i>DEM extraído de la vía Bogotá - Villavicencio</i>	52
Figura 4.8.1 <i>DEM, Sitio 21 - K58 de la vía Bogotá – Villavicencio.</i>	54
Figura 4.8.2 <i>Etapa de pre procesamiento, llenado de sumidero.</i>	56
Figura 4.8.3 <i>Vista del SAGA del DEM original y DEM sin sumideros</i>	56
Figura 4.8.4 <i>Flujo de acumulación hallado en SAGA, para sitio 21-K58 de la vía Bogotá – Villavicencio</i>	57
Figura 4.9.1 <i>Flujo de acumulación exportado de SAGA a QGIS</i>	59
Figura 4.9.2 <i>Deslizamiento Meseta Mesagrande K58 de la Vía Bogotá – Villavicencio</i>	60
Figura 4.9.3 <i>Diseño de rango de flujo de acumulación crítico, valores entre 4000 y 22000</i>	61
Figura 4.9.4 <i>Diseño de rango de flujo de acumulación crítico, valores entre 5000 y 7500</i>	62
Figura 4.9.5 <i>Rango definitivo para análisis de zonas con riesgo de afectación por flujo de acumulación.</i>	63
Figura 4.9.6 <i>Vista de UGI con rampla de tonos que define las condiciones del terreno teniendo en cuenta el rango para pixeles entre $1500 < F. A < 3000$</i>	63
Figura 4.9.7 <i>Observación de rango de calibración en el modelo</i>	64
Figura 4.9.8 <i>UGI con anotaciones de texto de aquellos sitios con alta propensión de desencadenar movimientos en masa</i>	66

Figura 4.9.9 <i>Zonas de Riesgo sectorizadas.</i>	67
Figura 4.9.10 <i>Interpretación visual de puntos con F.A>3000.</i>	68
Figura 4.9.11 <i>Polilíneas para sitios con flujo de acumulación mayor a 3000.</i>	70
Figura 4.9.12 <i>Polilíneas y polígonos exportados a Google Earth.</i>	71
Figura 4.9.13 <i>Redes de canales representados por polilíneas y por consiguiente por flujos >3000.</i>	72
Figura 4.9.14 <i>Parte profunda del deslizamiento representada por polilíneas y por consiguiente por flujo >3000</i>	73
Figura 4.9.15. <i>Esquema conceptual de la metodología.</i>	74
Figura 6.8.1. <i>Derrumbe sector Quebradablanca, año 1974</i>	131
Figura 6.9.1. <i>Comparativo afectación talud año 2015 y 2019.</i>	133
Figura 6.9.2. <i>Socavación parte lateral del talud.</i>	135
Figura 6.11.1. <i>Inicio del deslizamiento en el PR64+200, 14 de julio de 2018.</i>	138
Figura 6.11.2. <i>Obras de estabilización de la ladera, 15 de mayo de 2019</i>	138
Figura 6.11.3. <i>El proceso se alinea con el trazo de una microcuenca que llega hasta el parteaguas que limita el proceso erosivo del PR64+000. 09 de julio de 2019.</i>	139
Figura 6.11.4. <i>Desprendimiento del PR64+200. Junio de 2020.</i>	140
Figura 6.13.1. <i>Zona de afectación en perfil geológico Túnel Buenavista.</i>	142
Figura 6.13.2. <i>Localización de la zona de afectación en perfil geológico Túnel Buenavista</i>	142

Lista de Tablas

Tabla 3.1.1	Glosario de nombres para la caracterización de movimientos en masa.....	26
Tabla 3.1.2	Criterios para determinar el grado de susceptibilidad a los deslizamientos.	28
Tabla 3.1.3	Distribución de los terrenos geológicos en los dominios de amenaza relativa.	30
Tabla 3.1.4	Criterios de clasificación de los movimientos en masa	31
Tabla 3.1.5	Velocidad de los movimientos.....	32
Tabla 3.1.6	<i>Lista de algoritmos usados para el cálculo de dirección de flujo.</i>	<i>35</i>
Tabla 4.9.1	Categorización de los rangos del flujo de acumulación.....	65

Resumen

La determinación de sitios inestables en taludes adyacentes a la vía Bogotá- Villavicencio es el propósito de este estudio, se hace mediante la identificación de sitios en los que puede existir riesgo de generarse deslizamiento de material y mediante el análisis a través de la técnica de flujo de acumulación, haciendo uso los Sistemas de Información Geográfica y procesamiento de información digital; con la finalidad de que se realicen estudios adicionales en estas áreas y se ejecuten obras de mitigación que no permitan la afectación de la vía, disminuyendo costos por daños causados a la infraestructura existente y el costo que generan las intervenciones viales.

Palabras clave: Flujo de acumulación, sitios inestables, sistemas de información geográfica, obras de mitigación)

Abstract

Application of the flow accumulation technique, making use of geographic information systems; on slopes adjacent to the Bogotá – Villavicencio road that have failed and also those that have already been recovered, in order to determine new points where new landslides may occur.

The determination of unstable sites on slopes adjacent to the Bogotá-Villavicencio road is the purpose of this study, it is done by identifying sites where there may be a risk of material sliding and by analyzing through the flow technique. accumulation, making use of Geographic Information Systems and digital information processing; with the purpose of carrying out additional studies in these areas and carrying out mitigation works that do not allow the affectation of the road, reducing costs due to damages caused to the existing infrastructure and the cost generated by road interruptions.

Keywords: Accumulation flow, unstable sites, geographic information systems, mitigation works)

1. Introducción.

En Colombia se han presentado eventos naturales que generan pérdidas humanas y económicas, uno de estos eventos relevantes son los deslizamientos ocasionados en ciudades y representativamente en los corredores viales.

La Federación Colombiana de Transportadores de Carga por Carretera (COLFECAR, 2021), expone los departamentos con afectaciones en sus corredores viales mediante su participación en rangos de porcentaje de la siguiente manera:

- Magdalena, Arauca, Vichada, Guainía, Guaviare, Vaupés, Amazonas y Quindío. 0.1% y el 0.99%.
- La Guajira, Cesar, Atlántico, Sucre, Bolívar, Córdoba, Choco, Boyacá, Risaralda, Caldas, Valle del Cauca, Tolima, Cauca, Huila, Nariño, Caquetá y Putumayo. 1% y el 6.99%.
- Norte de Santander, Antioquia, Santander, Casanare, Cundinamarca y Meta. Mayor al 7%.

Con base en el estudio anterior se determina que los departamentos Meta y Cundinamarca representan una importante participación en la afectación de los corredores viales, y es de interés estudiar y verificar el motivo.

Cundinamarca tiene como capital Bogotá D.C y la capital del Meta, Villavicencio, es la ciudad céntrica comercial más importante de los Llanos Orientales; es por esto que la vía que une estas capitales es uno de los corredores viales más importantes del país, puesto que conecta mediante una doble calzada estas dos ciudades.

Por esta transitan vehículos que transportan hidrocarburos, aceites vegetales, productos agrícolas, turismo entre otros, según Ministerio de Transporte (2021) para el año 2020 se movilizaron en hidrocarburos 339.290.009 galones, aceite de palma 11.739.571 galones, en productos agrícolas se movilizaron 272.156 toneladas, en total se movilizaron 2.187.245,41

toneladas provenientes del departamento del Meta a diferentes partes de la geografía nacional (Martínez, 2021).

Desde que inicia su construcción se han presentado deslizamientos de gran magnitud como el ocurrido en junio de 1974 en el sector de Quebradablanca, así como también los deslizamientos del K58 y K64 de la vía Bogotá – Villavicencio que han ocasionado cierres desde el año 2019, generando elevación en el costo en el transporte y por consiguiente en el costo de los bienes o productos, debido a que no existe medio fluvial, ni férreo de menor costo o igual que sea alternativo.

Esta vía es concesionada, es decir que por su participación privada de administración y operación no debería presentar grandes problemas, pero generalmente la parte alta de los taludes o algunos tramos no están incluidos dentro de este contrato de concesión, no se cuenta con estudios geotécnicos especializados de todo el corredor, puesto que esto conlleva realizar ensayos de laboratorios de suelos dispendiosos y representa un elevado costo económico; y si aleatoriamente se tomaran muestreos y apiques habrían perdida en la toma de ensayos en puntos que no evidencien ninguna característica a sufrir movimientos en masa.

Se plantea metodología para la aplicación del método no solo en este corredor vial, si no en otras vías del país, partiendo de insumos encontrados en información geográfica, visitas de campo y estableciendo productos obtenidos, con el fin de dejar la base para la continuación de la construcción de conocimiento.

La técnica flujo de acumulación permite identificar zonas con mayor susceptibilidad a presentar deslizamientos para proponer obras civiles que prevengan o mitiguen el deslizamiento según corresponda a la evolución que presente. La detección temprana de posibles sitios inestables en los taludes de este corredor utiliza la metodología que evalúa la acumulación de flujo en un modelo digital de elevación apoyado con sistemas de información geográfica (SIG) y procesamiento digital de imágenes, determinando los sitios inestables con flujo acumulación que representen susceptibilidad a futuros deslizamientos.

1.1 Planteamiento del Problema

La afectación de los deslizamientos de la vía Bogotá Villavicencio se ha presentado desde su trazado pues esta discurre por la cordillera oriental, cadena montañosa que como lo explica Andrés Mora, PhD en geología estructural de la Universidad de Postdam, Alemania:

Es aún una adolescente. En ciertas regiones ha estado creciendo cinco milímetros anuales en el último millón de años. El páramo de Chingaza es una zona emblemática para ver estos procesos, porque aquí están las rocas más antiguas de toda la cordillera Oriental, que estuvieron a una mayor profundidad en el pasado, y hoy están a la mayor elevación topográfica. (Mora, A. 2019)

Es entonces, así como se entiende que está afectada por fallas geológicas, tipo de suelo, hidrología y demás condiciones que le hacen especialmente inestable, generando por consiguiente múltiples movimientos de tierra que ocasionan que la operación del corredor vial se vea afectada ya que se deben realizar cierres totales de vía generando grandes pérdidas económicas tanto para la región como para el país.

Su trazado inicio en 1759 el coronel Alvarado decide tomar el camino de Cáqueza que usualmente era usado por los indígenas y que partía de Santafé de Bogotá y discurría por el costado norte del río negro hasta llegar a un sitio denominado Gramalote (Villavicencio), en el siglo XIX es incorporado como camino nacional y en 1936 como vía nacional. (Pineda, C., & Sabogal, L. F., 2019).

Para el año 1974, se presenta el primer deslizamiento de tierra de grandes magnitudes, en el sector conocido como Quebrada Blanca ocasionando la pérdida de un puente vehicular, de 200 m de vía y acaba con aproximadamente 500 vidas. Posteriormente para el año 1994 el Instituto Nacional de Vías (INVIAS) firma con la Sociedad Concesionaria Vial de los Andes – COVIANDES S.A.S. En el año 2003 el INVIAS cede el contrato al Instituto Nacional de Concesiones (INCO) hoy Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) y de este modo se ha

manejado la construcción de la doble calzada, sectorizando su administración en tercio inicial, medio y construcción doble calzada Chirajara – Fundadores.

En el año 2019 se presenta activación de la inestabilidad del talud del K58, derrumbe también de relevante importancia por la gran cantidad de metros cúbicos que desplazo, como solución inmediata se hizo la construcción un muro tablestacado en lámina con el fin de contener los deslizamientos que se presenten mientras se cargan finalmente al sitio de disposición y evitar cierres prolongados del corredor vial. Exactamente en la Meseta de Mesa Grande, sector Guayabetal, pues desde la madrugada del pasado 13 de junio de 2019 se presentaron deslizamientos.

Posterior a esta fecha y durante 95 días esta ruta sufrió cierres continuos y pasos alternos mientras maquinaria y personal trabajaba arduamente removiendo rocas como la que cayó en medio de la calzada el viernes 27 de agosto y que peso más de 200 toneladas y como según lo menciona El Espectador (2020) existió el desprendimiento de 620.000 metros cúbicos en ese punto de la vía, equivalentes a 250 veces el agua contenida por una piscina olímpica.

Este movimiento de material tiene gran relevancia, en razón de que, como se mencionó afectó durante un tiempo prolongado la vía y además este corredor vial representa para una gran importancia para el país, ya que por allí transitan mercancías que ayudan a la economía nacional como hidrocarburos, aceites vegetales, productos agrícolas, turismo entre otros, según Ministerio de Transporte (2021) para el año 2020 se movilizaron en hidrocarburos 339.290.009 galones, aceite de palma 11.739.571 galones, en productos agrícolas se movilizaron 272.156 toneladas, en total se movilizaron 2.187.245,41 toneladas provenientes del departamento del Meta a diferentes partes de la geografía nacional (Martínez, 2021).

Estos hechos muestran el riesgo potencial que representan los taludes adyacentes de sufrir movimientos de material que impidan total o parcialmente el tránsito y que puede también ocasionar siniestros con daños y víctimas, haciendo mucho más costoso la solución de las

afectaciones generadas a personas y recuperación de la infraestructura que la construcción original.

1.2 Justificación.

La vía Bogotá – Villavicencio es uno de los corredores más importante del país y con gran inversión económica en su construcción y mantenimiento; pero pese a esto ha generado diferentes conflictos de orden económico y social debido a los múltiples deslizamientos que presenta. El Servicio Geológico Colombiano (SGC) (Montero, J. 2017) y su Sistema de Información de Movimientos en Masa estudia y genera información de los diferentes estudios de zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa, a nivel nacional departamental, municipal, áreas de estudio, grilla índice o escalas específicas, como el Mapa Nacional de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa a escala 1:100.000 y también la guía en la que se presenta una propuesta metodológica para realizar análisis de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000, adaptando los requerimientos presentados por la normatividad de ordenamiento territorial y gestión del riesgo.

Además, se desarrollan trabajos de investigación a nivel nacional para la determinación de zonas de riesgo, análisis de generación y afectación de los movimientos en masa en zonas urbanas, tramos viales o rurales; a partir de múltiples estudios de geología, cobertura de la tierra, clima y sismicidad que significan la demanda de un arduo trabajo como el realizado Servicio Geológico Colombiano y consolidado en libros como *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia* por Montero, J. (2017) y por ende se traducen en significativos gastos económicos para analizar o advertir su ocurrencia; es entonces cuando se hace necesario usar la técnica como trabajo pre exploratorio, para determinar el flujo de acumulación en el tramo vial Bogotá- Villavicencio para conocer las zonas de riesgo a la luz de esta técnica, partiendo de insumos modelos digitales de elevación geográfica, imágenes de satélites y caracterización en campo, para que a partir de este se complemente con estudios morfológicos, litológicos y estructurales, no propios de este documento y se pueda micro zonificar y realizar estudios a estas áreas menores, significando la reducción en la inversión de recursos.

Por otra parte, se resalta la importancia de que el presente trabajo se implemente para la doble calzada Bogotá Villavicencio, como para otros corredores viales puesto que las vías que son construidas a lo largo del país, están cimentadas bajo condiciones de montaña similares y se tiene la misma necesidad de predecir deslizamientos con el fin de viabilizar proyectos viales. La necesidad de la aplicación de la técnica también se fundamenta al ver la cantidad de terrenos en dominio de amenaza relativa alta y muy alta (Montero, J., 2017). Únicamente para los dominios en amenaza relativa muy alta se tiene involucrado todos aquellos departamentos que tienen como limite la falla Guaicaramo, falla de rio claro y Guavio, comprendiendo parte de departamento de Cundinamarca y se extiende hacia los llanos orientales

1.3 Alcance.

Determinar los sitios en los que a partir del análisis del flujo de acumulación se deduce que representan riesgo de afectación por movimientos en masa en la vía Bogotá- Villavicencio, partiendo de modelos digitales de elevación geográfica, imágenes de satélites, caracterización en campo y el análisis de la acción antrópica como detonante para la ocurrencia de deslizamiento.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General.

Conocer a partir de la aplicación de la técnica del flujo de acumulación los sitios inestables y determinar las áreas susceptibles a la ocurrencia de deslizamientos en los taludes adyacentes a la vía Bogotá-Villavicencio.

2.2 Objetivos Específicos.

- Emplear la técnica de flujo de acumulación a sectores que presenten deslizamientos activos para calibrar y determinar su aplicabilidad.
- Proporcionar nuevos principios que permitan avanzar en el análisis de la determinación de zonas de riesgo desde la aplicación de la técnica.
- Constatar la replicabilidad de acuerdo con los insumos que requiere la técnica a los diferentes puntos de la vía que puedan presentar colapso del talud y así mismo la aplicabilidad a otros tramos viales.

3. Marco de Referencia.

3.1 Marco Teórico.

A continuación, se ilustra conceptualizaciones que hacen referencia a la detección de posibles sitios inestables de taludes por medio de la técnica de flujo de acumulación apoyado por sistemas de información geográfica, con el fin de establecer las zonas en riesgo de la vía, esto para que posteriormente de haberlas identificado mediante el flujo de acumulación, se pueda profundizar su análisis con la aplicación de otros conocimientos no propios de este documento en cada área específica; como lo son el estudio del perfil completo de las unidades litológicas, las propiedades geomecánicas, discontinuidades estructurales, sismología, condiciones hidrológicas, entre otros detalles geomorfológicos; y así plantear métodos de prevención óptimos y mitigar la amenaza.

- **Sistemas de Información Geográfico (SIG), Herramienta Quantum Geographic Information System (QGIS) y System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA).**

El proceso para determinar flujo de acumulación se lleva a cabo en programa QGIS y en el complemento llamado SAGA, definiendo QGIS es una herramienta GIS gratuita, de software libre, multiplataforma y escalable gracias al desarrollo de extensiones (plugins) en lenguajes Python y C++. Su misión es ayudar y promover el desarrollo colaborativo de software de código libre para la geomática. Hoy en día, QGIS es un paquete de aplicaciones para el procesamiento de información geográfica que es muy apreciado por muchos usuarios (www.qgis.org). De fácil manejo y ergonómico, permite recoger, almacenar, procesar, analizar, gestionar y presentar todo tipo de datos espaciales y geográficos, de la misma manera que los programas comerciales. Sus siglas significan Quantum Geographic Information System. Baghdadi N., Mallet C y Zribi M. (2020).

Por otra parte, SAGA, abreviatura de System for Automated Geoscientific Analyses (Sistema de Análisis Geocientífico Automatizado), es un programa informático de Sistema de Información Geográfica (SIG), software libre de código abierto (FOSS). El primer objetivo de SAGA es ofrecer a los geocientíficos una plataforma eficaz pero fácil de aprender para la aplicación de métodos geocientíficos. La interfaz gráfica de usuario permite gestionar y visualizar datos, así como realizar análisis y manipulaciones de datos mediante la ejecución de módulos. Además de las barras de menús, herramientas y estado, típicas de la mayoría de los programas modernos, SAGA ofrece al usuario tres elementos de control adicionales. El control del espacio de trabajo tiene subventanas para los espacios de trabajo de módulos, datos y mapas. Cada espacio de trabajo muestra una vista en árbol, a través de la cual se puede acceder a los objetos asociados al espacio de trabajo. Dependiendo del objeto seleccionado en un espacio de trabajo, el control de propiedades del objeto muestra un conjunto de subventanas específicas del objeto (<https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html>).

QGIS y SAGA son entonces perteneciente al sistema de información geográfica (GIS), siendo este último un entorno para recopilar, gestionar y analizar datos. Arraigado en la ciencia de la geografía, el GIS integra muchos tipos de datos. Analiza la ubicación espacial y organiza capas de información en visualizaciones usando mapas y escenas 3D (ESRI, s.f.).

Felicísimo, A. (1994), define sistema de información geográfica, como un sistema de gestión de base de datos con herramientas específicas para el manejo de información espacial y sus propiedades. Los tipos de propiedades que un SIG debe poder analizar, tanto independiente como conjuntamente, son tres: métricas, topológicas y atributivas.

- **Unidades Geomecánicas de Comportamiento Independientes (UGI).**

El presente trabajo se apoya entonces en el sistema de información geográfico haciendo uso de la herramienta QGIS, así entonces también se requiere ubicar espacialmente el área a la que se va a aplicar la técnica, determinando los puntos inicio-fin de la vía de estudio y

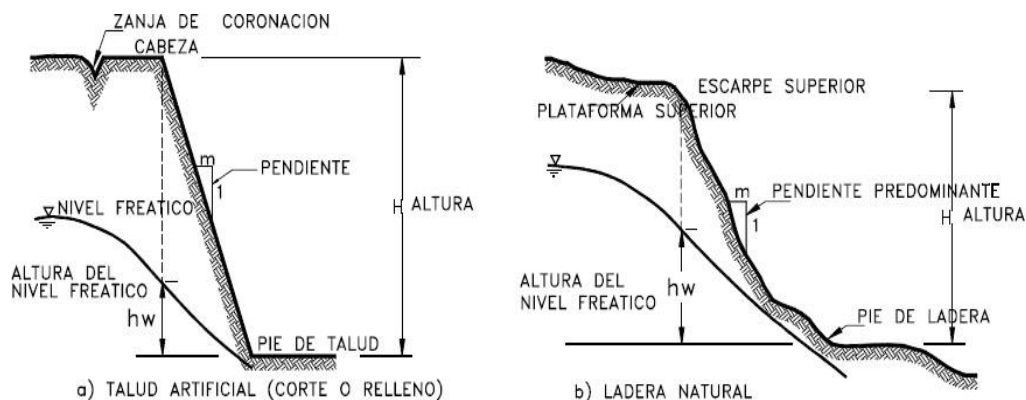
delimitándola por zonas de acuerdo al relieve presente. Para esto se delimita en Unidades morfológico-geológica de comportamiento Geomecánico Independiente (UGI), Chica, A. (1987) plantea que esto se logra combinando criterios morfológicos, litológicos y estructurales que permitan delimitar una zona cuya estabilidad no dependa del comportamiento de las zonas vecinas y complementariamente el caso viceversa.

Sin embargo, es cierto el termino definido como UGI según Chica, A. (1987), involucra estudios morfológicos, litológicos y estructurales, pero como el mismo autor lo expone; en una etapa inicial la delimitación de esta unidad básica puede darse por cambios definitivos de pendiente, es por esto que el área de estudio se subdivide en UGI y es de acuerdo a estas que se hace el análisis del comportamiento del flujo de acumulación. Dicho análisis corresponde al trabajo pre exploratorio para identificar desde esta técnica los posibles sitios que pueden verse afectados por movimientos en masa. El autor también menciona que la unidad básica morfológicamente definida puede ampliarse o reducirse en extensión de acuerdo a las unidades litológicas presentes, sus propiedades geomecánicas y las estructuras geológicas.

- **Sistemas de Clasificación de Movimientos en Masa.**

Identificadas UGI y para dar inicio a la aplicación de la técnica se hace necesario analizar las mismas desde los conceptos que caracterizan la forma del relieve que predomina el terreno sobre el que está construido la vía a estudiar. La vía esta cimentada sobre taludes o laderas, estas son definidas por Suarez, J. (1998) como: masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente (Figura 3.1.1.).

Figura 3.1.1 Nomenclatura de taludes y laderas.



Nota. Diferencia entre talud y ladera, y parte de cada una. Tomado de *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, por J. Suarez, 1998.

En la figura 3.1.1. además de diferenciar un talud artificial y una ladera artificial también expone los elementos constitutivos del talud y que son definidos por Suarez, J. (1998) así:

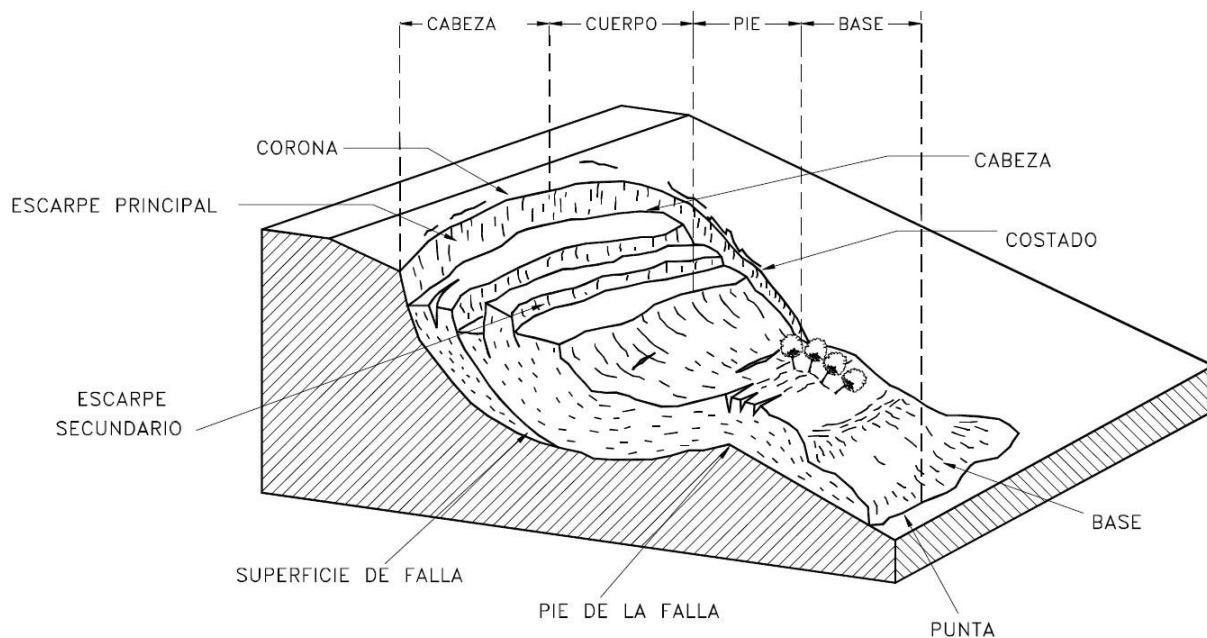
- **Altura.** Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados.
- **Pie.** Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.
- **Cabeza o escarpe.** Se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior.
- **Altura de nivel freático.** Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza.
- **Pendiente.** Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m/1$, en la cual m es la distancia horizontal

que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo: Pendiente: 45o, 100%, o 1H:1V. (p. 2).

Ahora bien, los taludes pueden sufrir una variedad de procesos que resulta en el movimiento hacia abajo y hacia el exterior de materiales formadores de pendiente incluyendo roca, suelo, relleno artificial, o una combinación de estos y en el proceso de movimiento los materiales pueden moverse por la caída, volcamiento, deslizamiento, difusión o corrientes.

La figura 3.1.2 muestra una ilustración grafica de un deslizamiento de tierra o movimiento en masa típico, con la terminología comúnmente aceptada que define sus características. Los diversos tipos de deslizamientos se pueden diferenciar por el tipo de material en cuestión y el modo de movimiento, tema tratado por varios estudiosos, entre estos Cruden y Varnes, de quienes cuya metodología de clasificación se expondrá consolidada más adelante.

Figura 3.1.2 *Nomenclatura de un deslizamiento.*



Nota. Tomado de *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, por J. Suarez, 1998.

Cada una de las características es definida por Suarez, J. (1998) como:

- Escarpe principal. Corresponde a una superficie muy inclinada a lo largo de la periferia del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material fuera del terreno original. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material forma la superficie de falla.
- Escarpe secundario. Una superficie muy inclinada producida por desplazamientos diferenciales dentro de la masa que se mueve.
- Cabeza. Las partes superiores del material que se mueve a lo largo del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- Cima. El punto más alto del contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.
- Corona. El material que se encuentra en el sitio, prácticamente inalterado y adyacente a la parte más alta del escarpe principal.
- Superficie de falla. Corresponde al área debajo del movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo de la superficie de falla no se mueve.
- Pie de la superficie de falla. La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.
- Base. El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.
- Punta o uña. El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.
- Costado o flanco. Un lado (perfil lateral) del movimiento.
- Superficie original del terreno. La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.

- Derecha e izquierda. Para describir un deslizamiento se prefiere usar la orientación geográfica, pero si se emplean las palabras derecha e izquierda debe referirse al deslizamiento observado desde la corona mirando hacia el pie. (pp. 3-4).

Debido a que los movimientos en masa dependen de la pendiente, la velocidad, características geométricas y estructura geológica, la clasificación de movimientos ha sido estudiada por varios autores y cada uno de ellos ha tomado un foco de clasificación diferente; Cruden y Varnes propusieron que los movimientos de un talud incluyen una combinación de dos o más de los principales tipos de desplazamiento, este tipo de movimientos se les denomina como “Complejo” (Tabla 3.1.1). Adicionalmente, un tipo de proceso activo puede convertirse en otro a medida que progresa el fenómeno de desintegración; es así como una inclinación puede terminar en caído o un deslizamiento en flujo. (Suarez, 1998)

Tabla 3.1.1 Glosario de nombres para la caracterización de movimientos en masa.

Tipo	Secuencia	Estado de actividad	Estilo	Velocidad	Humedad	Material
Caído	Progresivo	Activo	Complejo	Extremadamente	Seco	Roca
Inclinación	Retrogresivo	Reactivado	Compuesto	rápido	Húmedo	Tierra
Deslizamiento	Ampliándose	Suspendido	Múltiple	Muy rápido	Mojado	Residuos
Esparcimiento	Alargándose	Inactivo	Sucesivo	Rápido	Muy	
Flujo	Confinado	Dormido	Sencillo	Moderado	Mojado	
	Disminuyendo	Abandonado		Lento		
	Moviéndose	Estabilizado		Muy lento		
		Relicto		Extremadamente lento		

Nota. Adaptado de Cruden, D. M. & Varnes D. J. (1996).

En la tabla 3.1.1, se exponen los focos y las variaciones que presenta el movimiento en masa, estos fueron en los que se centraron los estudios de Cruden y Varnes, agrupándolos de acuerdo al tipo, secuencia, actividad, estilo, velocidad, humedad y material.

El estado de la actividad asociada a los deslizamientos (movimientos en masa) hace referencia a su evolución en el tiempo (Suarez, J. 1998). Y es determinante para el presente estudio, Cruden, D. M. & Varnes D. J. (1996) plantean los siguientes estados de actividad:

- Activo. Deslizamiento que se está moviendo en los actuales momentos.
- Reactivado. Movimiento que está nuevamente activo, después de haber estado inactivo. Por ejemplo, deslizamientos reactivados sobre antiguas superficies de falla.
- Suspendido o interrumpido. Deslizamientos que han estado activos durante los últimos ciclos estacionales pero que no se está moviendo en la actualidad.
- Inactivo. Deslizamientos que llevan varios ciclos estacionales sin actividad.
 - Dormido o latente. Deslizamiento inactivo pero que las causas del movimiento aparentemente permanecen.
 - Abandonado. Es el caso de un río que cambió de curso y que estaba produciendo un deslizamiento.
 - Estabilizado. Movimiento suspendido por obras remediales artificiales.
 - Relicto. Deslizamientos que ocurrieron posiblemente, hace varios miles de años se pueden llamar deslizamientos Relictos. (p. 27-28).

Definiendo la actividad de los movimientos también es de gran relevancia estudiar la facilidad con la que un fenómeno puede ocurrir sobre la base de las condiciones locales del terreno y esto lo denomina como susceptibilidad Suarez, J. (1998) y precisa que la probabilidad de ocurrencia de un factor detonante como una lluvia o un sismo no se considera en un análisis de susceptibilidad.

Plantea que la susceptibilidad se puede evaluar de dos formas diferentes:

- Sistema de la experiencia. Se utiliza la observación directa de la mayor cantidad de deslizamientos ocurridos en el área estudiada y se evalúa la relación entre los deslizamientos y la geomorfología del terreno.
- Sistema teórico. Se mapea el mayor número de factores que se considera que puedan afectar la ocurrencia de deslizamientos y luego se analiza la posible contribución de cada uno de los factores. Suarez, J. (1998).

Expone que para la elaboración del mapa de susceptibilidad se tienen en cuenta generalmente tres elementos: inventario de deslizamientos ocurridos en el pasado, topografía y mapa de pendientes y características geológicas, geomorfológicas y geotécnicas del terreno; y se consolida en la tabla 3.1.2 lo planteado por Kanungo, (1993) en relación con los criterios necesarios para determinar el grado de susceptibilidad a los deslizamientos.

Tabla 3.1.2 Criterios para determinar el grado de susceptibilidad a los deslizamientos.

Grado de susceptibilidad	Criterio
Muy alta	Laderas con zonas de falla, masas de suelo altamente meteorizadas y saturadas, y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe alta posibilidad de que ocurran
Alta	Laderas que tienen zonas de falla, meteorización alta a moderada y discontinuidades desfavorables donde han ocurrido deslizamientos o existe la posibilidad de que ocurran.
Moderada	Laderas con algunas zonas de falla, erosión intensa o materiales parcialmente saturados donde no han ocurrido deslizamientos pero no existe completa seguridad de que no ocurran.
Baja	Laderas que tienen algunas fisuras, materiales parcialmente erosionados no saturados con discontinuidades favorables, donde no existen indicios que permitan predecir deslizamientos.
Muy baja	Laderas no meteorizadas con discontinuidades favorables que no presentan ningún síntoma de que puedan ocurrir deslizamientos.

Nota. Tomado de Kanungo D.P. (1993).

También, Montero, J. (2017) con el Servicio Geológico Colombiano (anteriormente INGEOMINAS), expone como resultado mapa de categorías de amenaza relativa de movimientos en masa de Colombia, basándose en el mapa de provincias de amenaza relativa de movimientos en masa de Colombia, de Montero, J., Cortés, R. (1989). En dicho mapa se consideran quince provincias de amenaza numeradas en orden decreciente de susceptibilidad a deslizamientos, flujos y otros procesos, y cada provincia comparte rasgos inherentes y factores desencadenantes similares por lluvias, sismos y otros factores, incluidos los antropogénicos. Estas quince provincias de amenaza se agrupan en cinco categorías: Muy Alta, Alta, Media, Baja y Muy Baja, según la distribución de la inestabilidad en el territorio, teniendo en cuenta la densidad, frecuencia y recurrencia de los movimientos (INGEOMINAS, 2002); así también como resultado consolida las características dominantes de las provincias de amenaza agrupadas en las cinco categorías y los procesos de inestabilidad más comunes en cada provincia. Para el área a estudiar se cuenta con los estudios que determinan que la zona pertenece a la categoría de amenaza relativa muy alta y expone en la tabla 3.1.3 todas las características dominantes para esta provincia.

Tabla 3.1.3 Distribución de los terrenos geológicos en los dominios de amenaza relativa.

Terrenos en dominios de amenaza relativa Muy Alta	
N.º 11 Quetame	Límites. Este: Falla de Guaicaramo, con cabalgamiento al este, Noroeste: Sistema de falla del río Claro, Guavio (Falla de Altamira).
	Descripción. El 80 % de este terreno está conformado por filitas y pizarras, que alternan con areniscas cuarzosas y lodosas; en el margen noroeste se presenta una franja de areniscas cuarzosas, arcillolitas, lodolitas grises, y ocasionalmente calizas y conglomerados del Carbonífero, junto con una pequeña porción de shales, calizas, areniscas y chert del Cretáceo superior, y en el piedemonte (costado suroriental), areniscas de grano fino a conglomeráticas, interestratificadas con arcillolitas y limolitas del Paleógeno, y abanicos aluviales y depósitos coluviales depositados por el río Ariari.
N.º 33 Terreno adjunto borde Llanero	Ubicación. Terreno propuesto adjunto al supraterrano Cretáceo en la estribación oriental de la cordillera Oriental en el corredor de la Falla de Guaicaramo y otras fallas del borde Llanero; incluye los depósitos aluviotorrenciales del piedemonte.
	Descripción. Terreno conformado por rocas sedimentarias del Terciario y cristalinas del Mesozoico y Paleozoico afectadas de manera severa en el corredor de los sistemas de falla del borde Llanero.

Nota. Quetame y Terreno adjunto al borde Llanero abarcan la zona de estudio y por consiguiente son terrenos de dominios de amenaza relativamente Muy Alta y describe sus características dominantes en esta tabla. Tomado de Montero, J. (2017), extraído con formato del texto propio.

Además, también Montero, J. (2017), describe las características de acuerdo a las provincias de amenaza relativa, en el caso de estudio pertenece al oriente y dominio de amenaza Muy Alta, exponiendo que:

El relieve es alto, la precipitación varía de 1000 a 3000 mm/año, algo más húmedo en el costado oriental; la amenaza sísmica varía de media a alta y el impacto antrópico es también muy severo. Los terrenos de este dominio se involucran en extensos reptamientos y deslizamientos, principalmente dentro de las rocas lodosas y coluviones asociados; las a deslizamientos traslacionales, con gran influencia del grado de litificación y su actitud estructural;

también son frecuentes los deslizamientos rotacionales, que involucran rocas con debilidad inherente o adquirida, los deslizamientos compuestos y los flujos de detritos y tierras; así mismo, la caída de rocas y el rodamiento de fragmentos de roca que yacen al pie de secuencias subhorizontales. En muchas laderas, dentro del Cretáceo y el Terciario (Paleógeno), se presentan además descargas torrenciales y torrentes de bloques. También Montero, J. (2017), determina y clasifica los movimientos en masa en catastróficos, muy severos, menores (Tabla 3.1.4).

Tabla 3.1.4 Criterios de clasificación de los movimientos en masa.

Grupo	Movimiento	Criterio
1	Catastróficos	Efectos con daños muy significativos para la economía nacional o pérdidas de centenares de vidas humanas.
2	Muy severos	Efectos con algunas víctimas humanas y damnificados, con costos muy cuantiosos para la economía regional.
3	Menores	Efectos con daños menores y sin víctimas humanas, hasta efectos no registrados.

Nota. Los movimientos se clasificaron en tres grupos, teniendo en cuenta sus efectos, de acuerdo con los criterios que se mencionan. Montero, J. (2017), extraído con formato del texto propio.

En relación con poder destructivo de un deslizamiento la velocidad del movimiento de masa tiene gran influencia. Generalmente, los deslizamientos extremadamente rápidos corresponden a catástrofes de gran violencia, ocasionalmente con muchos muertos y cuyo escape es poco probable. En la tabla 3.1.5 se indica la escala de velocidades de movimientos propuestas por el Transportation Research Board de los Estados Unidos, la cual se puede considerar como escala única de movimiento. En algunos casos, ocurren velocidades diferentes de los diversos modos de movimiento y se requiere definir cada uno de ellos.

Tabla 3.1.5 Velocidad de los movimientos.

Clase	Descripción	Velocidad (mm/sg)	Desplazamiento	Poder destructor
7	Extremadamente rápido			Catástrofe de violencia mayor; edificios destruidos por el impacto o el material desplazado, muchas muertes; escape improbable.
		5×10^3	5 m/seg	
6	Muy rápida			Alguna pérdida de vidas; velocidad demasiado alta para permitir a todas las personas escapar.
		5×10^1	3 m/min	
5	Rápida			Escape posible; estructuras, propiedades y equipos destruidos.
		5×10^{-1}	1.8 m/hora	
4	Moderada			Algunas estructuras temporales y poco sensitivas pueden mantenerse temporalmente.
		5×10^{-3}	13 m/mes	
3	Lenta			Construcciones remediales pueden llevarse a cabo durante el movimiento. Algunas estructuras insensitivas pueden mantenerse con mantenimiento frecuente.
		5×10^{-5}	1.6 m/año	
2	Muy lenta			Algunas estructuras permanentes no son dañadas por el movimiento.
		5×10^{-7}	16 mm/año	
1	Extremadamente lenta			Imperceptibles sin instrumentos; construcción posible pero deben tenerse precauciones.

Nota. Tomada de Cruden, D. M. & Varnes D. J. (1996).

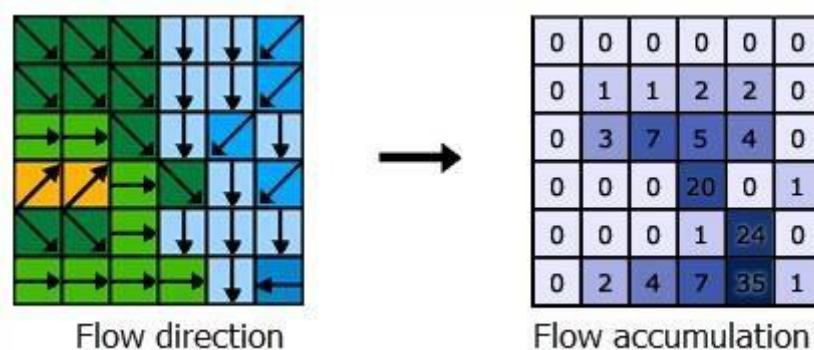
- **Flujo de Acumulación.**

Estos conceptos se toman como base de la metodología de estudio de movimientos en masa, conocimiento que permite encasillarlos de acuerdo a sus características y que son fundamentales para comprenderlos desde la técnica del flujo de acumulación, que es el proceso mediante el que el software QGIS determina el comportamiento del agua en la superficie, es decir con Modelos de Elevación Digital calcula el peso acumulado de todas las celdas que fluyen

en cada celda de pendiente descendente en el ráster de salida. En caso de no proporcionarse un ráster de peso, se aplica un peso de 1 a cada celda, y el valor de celdas en el ráster de salida es el número de celdas que fluye en cada celda.

Las celdas con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y pueden ser útiles para identificar canales de arroyos. Las celdas con una acumulación de flujo de 0 son alturas topográficas locales y se pueden utilizar para identificar cresta, ESRI (s.f.). En el ráster resultante del proceso en el desarrollo de este trabajo pone en evidencia aquellas celdas con una acumulación de flujo alta correspondientes a áreas de flujo concentrado o saturado. En la figura 3.1.3 está el concepto base del proceso para determinar el flujo de acumulación.

Figura 3.1.3. Dirección y valor del flujo de acumulación.



Nota. En la imagen izquierda muestra a dirección hacia la que fluye cada celda y la de la derecha cuantifica el valor de celdas que van hacia cada celda, proceso del flujo de acumulación. Tomado de *ESRI. (s.f).*

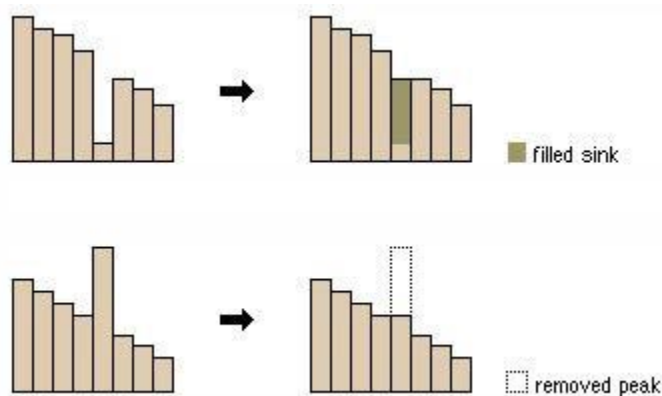
Como base para el estudio también es necesario conocer dos productos ráster que se requieren generar antes de obtener el flujo de acumulación: archivo ráster Fill (Relleno) y archivo ráster Flow Direction (Dirección de flujo).

Relleno o Fill, es frecuente encontrar sumideros y picos en un DEM, que para el caso se interpretan como errores generados por la resolución de los datos o aproximaciones al valor entero más cercano. Para realizar una correcta representación de cuencas y arroyos, los sumideros deben rellenarse y garantizar su continuidad.

Se realizan iteraciones en el DEM hasta que se rellenen todos los sumideros que se encuentren dentro de un límite Z determinado. La función de la herramienta Fill se expresa mediante la Figura 3.1.4., en la que se aprecia 4 imágenes que representan el caso en el que, si se hiciera un corte transversal al raster, se mostraría una serie de rectángulos cuya medida en ancho es la misma, pero en altura es variable. Ahora para comprender como funciona, en la primera imagen de la izquierda, se puede imaginar como una gota que va descendiendo de los rectángulos más altos de la izquierda hacia la derecha, cae en el orificio o rectángulo más bajo o a lo que se le conoce como sumidero en el raster. Entonces para que esta gota no quede allí debe rellenarse esa celda (representada por el rectángulo más bajo) con promedios; es decir se halla promedio de las alturas que están a los lados y con ese valor se rellena esta celda.

En la imagen derecha superior de la Figura 3.1.4., se tiene igualmente la representación del corte transversal del raster, pero ya corregido con el método anterior, el sumidero fue rellenado con el valor de la altura de los rectángulos contiguos a este; si se imagina de nuevo la gota que fluye de izquierda a derecha, sobre los rectángulos, fluiría continuamente ya que no existe ninguna depresión o sumidero. En las dos últimas imágenes de la Figura 3.1.4., está la representación gráfica del mismo proceso de Fill, pero en caso contrario, es decir en caso que en vez de sumidero exista un pico, este rectángulo o celda sea recortado con una altura resultante de los promedios de las celdas vecinas.

Figura 3.1.4. Vista de perfil de un sumidero y un pico antes y después de ejecutar Relleno.



Nota. Tomado de ESRI, (s.f).

Dirección de Flujo, la cual permite determinar sobre una celda ráster hacia qué dirección se va el flujo de una superficie, el proceso es tomar una superficie de entrada y devuelve como resultado un ráster que muestra la dirección de flujo que sale desde cada celda. Existen diferentes enfoques que se muestran en la Tabla 3.1.6 relacionados con la dirección hacia donde puede fluir el agua.

Tabla 3.1.6 Lista de algoritmos usados para el cálculo de dirección de flujo.

ALGORITMO DE DIRECCIÓN DE FLUJO	DESCRIPCIÓN
BR: Braunsch weiger relief model	La dirección del flujo es el límite máximo entre tres celdas vecinas, para evitar la dispersión de un flujo excesivo.
D8: Algoritmo determinístico del octavo nodo	El flujo se dirige a uno de las ocho celdas vecinas según la dirección del descenso más empinado.

DI: Algoritmo determinístico del nodo infinito	Especifica la dirección del flujo continuamente y asigna la dirección del flujo a una o máximo dos de las celdas con pendiente descendiente.
MFD: Dirección de flujo múltiple	Permite distribuir el flujo a varias celdas vecinas utilizando métodos ponderados por pendiente.
MGD: Dirección de flujo múltiple basado en el gradiente de máxima pendiente	Permite la distribución de flujo a varios vecinos de ladera abajo utilizando métodos ponderados por pendiente que varían como una función lineal del gradiente máximo de pendiente descendente.
Rho 8: Algoritmo del octavo nodo aleatorio	Versión estocástica de algoritmo D8 que dirige el flujo a uno de los ocho vecinos y produce una dirección de flujo media igual.
TFD: Algoritmo Triangular de múltiple dirección de flujo	Divide cada celda en ocho caras triangulares, calcula las direcciones de la pendiente local y los gradientes alrededor de cada celda y distribuye el flujo en las direcciones de la pendiente descendente utilizando una pendiente ponderada.

Nota. Tomado de *Casallas, 2022, p. 25*)

3.2 Marco conceptual.

EROSIÓN: Es el desgaste de las partículas orgánicas y minerales del suelo, lo que puede ser ocasionado por varios factores, principalmente por el agua y por el viento. (Marconi, 2011).

DEM: Modelo de Elevación Digital, representación de ráster de una superficie continua, que en general hace referencia a la superficie de la tierra. Son los datos digitales basados en celdas más comunes de la forma de la superficie de la tierra. Estos datos se utilizan como entrada para cuantificar las características de la superficie del suelo. En general, los errores de los DEM se clasifican como sumideros o picos. Un sumidero es un área rodeada por valores de mayor elevación que también se conoce como depresión o concavidad. Esta es un área de drenaje interno. Si bien muchos sumideros son imperfecciones de los DEM, algunos pueden ser naturales, en particular en áreas de glaciares o karst. De la misma manera, un pico es un área rodeada por celdas de menor valor. Estas son entidades naturales más comunes y menos perjudiciales para el cálculo de la dirección de flujo.

Los DEM con modelo de datos vectorial están basados en entidades puntos y líneas definidas por sus coordenadas y la altura asociada a cada par coordenado. Los DEM con modelo de datos ráster, los datos se interpretan con el valor medio de la superficie dividida en teselas con distribución regular, sin solapes y con recubrimiento total del área representada.

En el modelo de datos vectorial existe una subclasificación según el tipo de representación de la información: Modelo Vectorial – Contornos y Modelo Vectorial TIN (Triangulated Irregular Network). (ESRI, s.f.)

DESLIZAMIENTOS: Es un movimiento hacia abajo y hacia afuera de los materiales que conforman un talud de roca, suelos naturales, rellenos o una combinación de ellos. (Suárez, 1989, p. 4).

SUBSIDENCIA: Es un fenómeno geológico a hace referencia al hundimiento paulatino de la corteza terrestre, continental o submarina. La subsidencia terrestre, en la cual se centra el

presente trabajo, es un fenómeno que implica el asentamiento de la superficie terrestre en un área extensa debido a varios factores, que pueden ser naturales o causados por el impacto de una gran variedad de actividades humanas. (Corapcioglu, 1984).

VOLCAMIENTO: Consiste en la rotación hacia delante de una unidad o varias, alrededor de algún punto de giro o pivote en su parte inferior, debajo de la unidad, por acción de la gravedad y la fuerza ejercida por unidades adyacentes o por fluidos en las grietas. (INVIAS, 2006).

3.3 Estado del Arte.

La disponibilidad de datos geoespaciales a nivel mundial ha aumentado el interés por el realizar análisis a partir de sistemas de información geográfico. Los modelos de elevación digital se encuentran como datos abiertos y cada vez de mayor confiabilidad. Se describen estudios con relación al presente documento y así también se expone la aplicación de la técnica del flujo de acumulación, impartida por el ingeniero Franc Montoya, aplicada en algunas vías en Colombia para determinar sitios en los que se puedan presentar deslizamientos.

Suarez, J. (1998), texto guía para el estudio y la práctica de ingeniería y geotécnia, incluye el análisis, diseño y construcción de taludes con énfasis en los problemas de deslizamientos de tierra. Nació como libro de apuntes del curso de estabilidad de taludes en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander, y el autor resalta que posterior a ser un libro de apuntes se debió hacer un arduo trabajo de investigación para la época sobre el estado del arte de la estabilidad de taludes en suelos residuales durante cinco años de trabajo permanente, puesto que la recopilación de información fue difícil, debido a que existían muy pocos libros guía sobre este tema en el mundo y se tuvo que acudir a la asistencia a congresos internacionales. El libro trata algunos temas a profundidad, pues el autor menciona la importancia de exponerlos teniendo en cuenta que no existen publicaciones sobre el tema en idioma español y otros los trata en forma general, debido a que existen otros textos mucho más especializados sobre temas específicos de la mecánica de suelos o la geología.

Los temas que se trataron a profundidad fueron los referentes a nomenclatura y clasificación de los movimientos en masa, es decir está expuesto en idioma español un estado del arte de autores que estudiaron este tema y lo denominaron sistemas de clasificación, inicia con lo propuesto por Hutchinson (1968) y continua con Varnes (1958 y 1978), siendo este último

actualizado por Cruden y Varnes en el "Special Report 247" del Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996) y este es el sistema que nos presenta Suarez en su libro; sin embargo, a esta clasificación se agregaron algunos factores importantes, entre ellos la diferenciación entre los procesos de deterioro y los de deslizamiento, pero en términos generales se mantuvieron los principios básicos de la clasificación del Transportation Research Board.

Así mismo el interés de Suarez fue profundizar en el estudio del comportamiento de los taludes en zonas tropicales, que son las presentes en el país y tienen susceptibilidad 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.

Por último, reúne cantidad de conocimientos que son comunes a materiales no tropicales, basados en la mecánica de suelos y la Ingeniería Geotécnica tradicional, enfocado a la prevención, estabilización y diseño de taludes.

Montero, J. (2017), en este documento el autor recopila varios sistemas de clasificación de movimientos en masa que se han estudiado a la fecha de publicación de este y desde la década de los treinta del siglo XX. El autor destaca que la ocurrencia de movimientos en masa en el país ha sido evidente desde hace décadas y menciona las ocurridas en varios municipios incluyendo los siguientes eventos que están localizados dentro del área de estudio del presente trabajo: en el municipio de Cáqueza en Cundinamarca y la afectación por interrupción de la vía Bogotá-Villavicencio, en la década de los años ochenta del siglo pasado, por el denominado deslizamiento de Quebradablanca.

El Servicio Geológico Colombiano (Montero, J. 2017) ha venido realizando estudios sistemáticos de los movimientos en masa en Colombia y se ha convertido en un referente para los expertos interesados en el tema, pero además el autor pretende también divulgar el conocimiento sobre la naturaleza y características de los movimientos en masa y otros procesos de inestabilidad para extender su comprensión a una población más amplia, que por ahora solo

llega a unas pocas personas privilegiadas y algunos expertos, el autor tiene como finalidad ampliar el conocimiento a muchas personas y grupos, si lo que se pretende es tener comunidades más resilientes.

La publicación está compuesta por dos etapas, la primera es una recopilación de los sistemas más conocidos de clasificación de los movimientos en masa iniciando con la clasificación de Sharpe (1938), que identifica el clima como primer factor incidente en los movimientos en masa; Terzaghi (1950) estudia al detalle el movimiento denominado como Creep, diferenciándolos de los deslizamientos por ser movimientos demasiado lentos; Hutchinson (1988), brinda muchas alternativas cinemáticas y le da a la clasificación de los movimientos en masa un enfoque geológico e hidrogeológico; Cruden & Varnes (1996), donde el autor describe la recopilación que ellos hicieron de las clasificaciones anteriores, explica al detalle conceptos de actividad, tasas de velocidad, distribución de la humedad; por último describe la clasificación de Hungr (2001), la que menciona como la más reciente clasificación de relacionada con los movimientos viscosos del tipo flujo, movimientos de más frecuente ocurrencia en el medio, además de ser los más peligrosos.

La segunda etapa se focaliza, en los cinco tipos de movimientos más frecuentes en nuestro país, presentando sus características con ejemplos considerando que las condiciones geológicas y climáticas son muy diferentes en las distintas regiones, para finalmente describir un escenario nacional de la distribución de los tipos de movimientos sobre los denominados terrenos geológicos de Colombia, todo esto a partir de la vasta experiencia del autor.

Mattivi, P., Franci, F., Lambertini, A. y Bitelli, G (2019), evalúan el desempeño de diferentes SIG de código abierto en el cálculo del Índice de humedad topográfica (TWI), un índice generalizado en el análisis hidrológico que describe la tendencia de un área a acumular agua. Hoy en día, hay una gran cantidad de GIS de escritorio de código abierto disponibles, mantenidos como proyectos FOSS, cada uno de ellos enfocado en el desarrollo de objetivos específicos. Por

lo tanto, desde el punto de vista del usuario, la elección del mejor software para resolver una tarea en particular está influenciada por las características específicas del SIG.

La prueba se realizó calculando el TWI para la cuenca del Río Sinigo, en el norte de Italia. El DEM del área de prueba ha sido procesado con GRASS GIS, Whitebox GAT y SAGA GIS. Para identificar flujos de trabajo iguales, se han estudiado todas las combinaciones de algoritmos y parámetros disponibles para cada SIG considerado. Los mapas TWI finales producidos como resultado fueron comparados y discutidos.

Álvarez, J., Casalí, M., González, A. y López, J. J. (2005), en este artículo se presentan los resultados de un trabajo sobre estimación de la humedad superficial del suelo en cuencas agrícolas mediante teledetección radar. En concreto, se analiza la posibilidad de aplicar esta técnica a condiciones en las que la cubierta vegetal puede atenuar el coeficiente de retrodispersión (σ_0) observado por los sensores radar. Para ello se emplean cinco imágenes adquiridas por el sensor RADARSAT-1 entre febrero y abril de 2003. La zona de estudio es una pequeña cuenca agrícola experimental, denominada La Tejería, situada en Navarra. Durante el periodo de estudio la mayor parte de la cuenca presentaba un cultivo de cereal de invierno en el estado fenológico 20-30 según la escala Zadocks. El método empleado para estimar la humedad del suelo, corrigiendo a su vez la atenuación causada por la vegetación, es un modelo semi-empírico denominado Water Cloud Model. Este modelo estima el valor de σ_0 de una cubierta en función del contenido de humedad de la vegetación y de la humedad superficial del suelo. El modelo puede ser empleado directamente para estimar la humedad, asumiendo que existe una relación lineal entre ésta y σ_0 , o como herramienta para corregir la atenuación de la vegetación en σ_0 y posteriormente aplicar otros métodos de estimación de humedad más complejos. El modelo se aplicó tanto a escala de parcela como a escala de cuenca. Los resultados obtenidos muestran un buen ajuste con las observaciones, aunque, a escala de parcela, la relación lineal entre la humedad del suelo y σ_0 parece ser muy sensible a la variabilidad de la rugosidad

superficial del suelo. A escala de cuenca la influencia de la variabilidad de la rugosidad se reduce y los resultados son muy prometedores. El modelo Water Cloud Model parece ser una herramienta útil para corregir la influencia que una cubierta de cereal ejerce en la estimación de la humedad del suelo mediante imágenes radar.

Jumbo, F. A. (2015), la cuenca hidrográfica considerada como la unidad territorial básica de planificación y gestión de los recursos hídricos, requiere la adecuada delimitación del área de captación o drenaje, ante tal situación la carencia de información geográfica de microcuencas de la unidad hidrográfica del río Casacay debe solucionarse, para tal efecto la investigación tuvo como objetivo la delimitación automática de microcuencas utilizando técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y datos del proyecto Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de 30 metros de resolución espacial. La metodología seleccionada fue la de Pfafstetter, con la cual se obtuvieron nueve microcuencas con su respectiva codificación, permitiendo continuar con la estandarización de cuencas adoptada por la Secretaría del Agua de Ecuador. Con los resultados de la investigación se actualiza la información de cuencas con mayor detalle, favoreciendo la ejecución de las tareas o actividades relacionadas con la gestión integral de la unidad hidrográfica estudiada.

Casallas, J. P. (2022), trabajo realizado para la identificación temprana de posibles sitios inestables en taludes con la finalidad de implementar medidas de prevención y alertas tempranas previos a la intervención de los sitios identificados. Con la finalidad de identificar los sitios inestables se utilizó la metodología que evalúa la acumulación de flujo en un Modelo Digital de Elevación con ayuda de herramientas SIG y procesamiento digital de imágenes: Como resultado de este proyecto realizado en la zona de estudio se logró identificar y cuantificar los sitios inestables con un elevado flujo acumulado susceptibles a futuros deslizamientos, en los cuales no es posible realizar una intervención constructiva convencional y se opta por la realización de

alternativas constructivas ya sean muros de contención, puentes, pontones u obras hidráulicas que no afecten la estabilidad del terreno.

Moreno, Y. Y. (2022), trabajo académico que aplica con apoyo en un Modelo de Elevación Digital –DEM, y Sistemas de Información Geográfica-SIG la técnica de flujo de acumulación en los taludes adyacentes al corredor vial Transversal Central del Pacífico-TCP, sector Tadó- La Virginia, para identificar sitios de deslizamientos asociados a causas antrópicas y la acumulación de flujo; alcanzando el objetivo de localizar posibles sitios donde el uso del suelo y un flujo de acumulación mayor sean factores determinantes en la ocurrencia de nuevos deslizamientos. Este producto ha de servir para llamar la atención del lector, que busca razones válidas para solicitar ante las entidades respectivas, la revisión temprana del tema y tomar medidas de control y prevención antes de los eventos de deslizamientos en la TCP.

4. Metodología

El desarrollo de este proyecto corresponde al método inductivo, pues es el proceso de conocimiento que se inicia por la observación de fenómenos particulares con el propósito de llegar a conclusiones y premisas generales que pueden ser aplicadas a situaciones similares a la observada (Méndez, 2013, p. 131) y además con cada investigación de caso se llega al surgimiento de nuevos procesos para complementar el método. Es un proyecto de tipo investigativo descriptivo, puesto que surge por la necesidad de estudiar y predecir deslizamientos a lo largo del corredor vial Bogotá-Villavicencio, para esto partiendo del conocimiento previo de la vía y de una inspección visual mediante la herramienta Google Earth, en la se delimitan unidades de comportamiento geo mecánico independiente (UGI) con base en diferentes cambios de pendiente.

Esto con la finalidad de seleccionar los sitios en los que hubo, hay o pueden presentarse deslizamientos e investigar que datos, modelos o archivos de elevación digital se encuentran disponibles como insumo para el geoprocésamiento que se debe llevar a cabo en el programa QGIS (SAGA) y que finalmente nos genere un mapa de flujo de acumulación que permita analizar el comportamiento visual y cuantitativamente.

Posterior, por cada sitio escogido se hace una descripción analítica de los datos reflejados en el mapa con el fin de determinar el comportamiento de los flujos de acumulación y la incidencia con la vía en estudio; es decir si interseca con esta y presenta flujo de acumulación entre 1500 y 3000 píxeles clasificarlo como sitio de alta propensión de ocurrencia de deslizamiento.

Así entonces la técnica del flujo de acumulación impartida por ingeniero Franc Montoya y consignada en la guía: *Determinación de puntos de amenaza de deslizamiento en una ladera con la ayuda del programa QGIS 3.24.3*, genera que el estudio de los deslizamientos en los taludes adyacentes a corredores viales

Dicho proceso comprendido entre la recopilación de la información, resultado de un arduo trabajo de investigación, y la determinación de las zonas de riesgo, debe llevar a cabo la metodología de flujo de acumulación que se explica a continuación, más detalladamente y para el caso particular de la vía Bogotá - Villavicencio:

4.1 Identificación de la Problemática.

A lo largo de los años se identifica que las vías adyacentes a los taludes tienden verse afectadas por continuos movimientos en masa que ocasionan taponamientos sobre estas y que impiden la movilidad en general, como se ha presenciado en la vía al llano. Vía en la que se presencia esta problemática, generado deslizamientos múltiples, involucrando grandes volúmenes de material y con cierres viales de tiempo indefinido.

4.2 Seleccionar el Tramo Vial.

Se debe delimitar el sector a evaluar de acuerdo al problema identificado, para el caso de estudio, puesto que este debe ser el trazado que conecte dos sitios o más y que representen importancia para la región en la que se encuentran. La vía en estudio parte de Bogotá, capital del país y conduce a Villavicencio, puerta de los Llanos Orientales de Colombia. Esta hace parte de la ruta 40 dentro de la red vial nacional y le corresponde el llamado tramo 06 (código 4006), tiene 86.06 km de longitud, está administrada por la Agencia Nacional de Infraestructura (ANI), es de tipo transversal que inicia en la ciudad de Buenaventura, departamento del Valle del Cauca y finaliza en Puerto Carreño, departamento del Vichada (Figura 4.2.1). Es una de las Rutas más importantes del país que atraviesa de oeste a este el país, uniendo el Pacífico colombiano con las principales ciudades del centro del país y los Llanos orientales con una longitud de 1155,55 km aproximadamente.

En este análisis pre exploratorio para determinar posibles sitios inestables a estas unidades que poseen características topográficas similares se les denomina como Unidades de Comportamiento Geo mecánico Independiente (UGI), que como se definió en concepto, en una etapa inicial se puede dar por la observación de cambios definitivos de pendiente. Chica, J. (1998).

Para el caso de estudio existe una gran cantidad de UGI en tramos de vía cortos debido a la acción antrópica que se ha venido desarrollando al traer una ruta de gran importancia por este sector, modificando las condiciones económicas y culturales de la población y por consiguiente la cobertura para satisfacer necesidades o simplemente con la intención de contribuir al desarrollo de un entorno geográfico.

Las UGI representadas mediante polígonos en Google Earth son exportadas como formato KML para posteriormente ser procesadas por el software QGIS. Para la zona de estudio se encontraron veintiocho UGI identificadas en tramo de vía Bogotá – Villavicencio (Figura 4.3.1).

Figura 4.3.1 Veintiocho UGI identificadas en tramo de vía Bogotá - Villavicencio.



Nota. UGI tomadas de la vía en estudio como polígono y extraídas en formato KML.

Adaptado de *Google Earth*.

El tramo vial de estudio inicia en el portal Bogotá del túnel El Boquerón ($4^{\circ}28'10.81''N$, $74^{\circ}5'19.77''O$) y finaliza en el portal Villavicencio del Túnel Buenavista ($4^{\circ}8'34.71''N$, $73^{\circ}39'49.45''O$).

Figura 4.3.2 Inicio – Fin, tramo de vía en estudio.



Nota. Vista con las marcaciones de lugar del punto inicial, Bogotá y punto final, Villavicencio. Adaptado de *Google Earth*.

4.4 Determinación del Punto más Crítico de la Vía en Observación.

Se hace un reconocimiento en campo e inspección visual lo largo de la doble calzada tomando como herramienta el programa informático Google Earth, con el fin inicial de conocer

deslizamientos de la zona en los que de acuerdo al estado de actividad de Cruden y Varnes (1996) estén inactivos o interrumpidos, obteniendo sus coordenadas y así también con la finalidad de buscar movimientos en masa que estén activos o reactivados, verificando si se está trabajando en alguna solución constructiva que permitan analizar las características y condicionantes del movimiento y además indagando noticias sobre estos puntos para determinar la afectación que han tenido sobre la calzada y determinar cuál es el sitio más crítico.

Una vez se tiene determinados los deslizamientos, se poligonizan en Google Earth (Figura 4.3.1) y se analiza por cada uno de estos el grado de susceptibilidad en relación con los criterios propuestos por Kanungo (1993), específicamente para los grados de susceptibilidad muy alta y alta, que son los niveles en los que según el autor ya han ocurrido deslizamientos (Tabla 3.1.2). Otro aspecto relevante en la determinación del punto más crítico son los efectos que el movimiento de masa causo, efectos que, según Montero, J. (2017) se agrupan en 3, catastróficos, muy severos y menores, para encontrar el punto más crítico del corredor vial se busca el nivel que genere mayor afectación en este caso el que tenga efectos con daños muy significativos para la economía nacional o pérdidas de centenares de vidas humanas.

4.5 Ráster de Elevación.

Ya teniendo definidas las UGI se requiere buscar, clasificar y seleccionar un modelo de elevación digital que abarque todas las zonas que se definieron como taludes adyacentes con riesgo de deslizamiento y que sea del tamaño más apropiado para que no queden sitios de interés sin estudiar; pero tampoco que sea un DEM difícil de procesar por el programa (Figura 4.6.1). El DEM es obtenido del portal Vertex de la NASA (EARTHDATA Search, s.f.) y corresponde al MDE del sensor ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite) con una resolución espacial de las curvas de nivel cada 12.5 m. Este modelo digital fue extraído para la zona de Colombia mediante las herramientas de procesamiento del QGIS en el que se pueden

analizar todas las UGI halladas, de buena precisión y no tan extenso, permitiendo así un ágil procesamiento por el software, tiene 12.5 m de resolución de celdas de los contornos digitales.

Resolución que de acuerdo a estudios permite trabajar a buena precisión, como el estudio llevado a cabo por Montgomery D., Zhang W. (1994) en el que utilizan datos de elevación digital de alta resolución de dos pequeñas cuencas en el oeste de los Estados Unidos para examinar el efecto del tamaño de cuadrícula del modelo de elevación digital (DEM) en la representación de la superficie terrestre y las simulaciones hidrológicas.

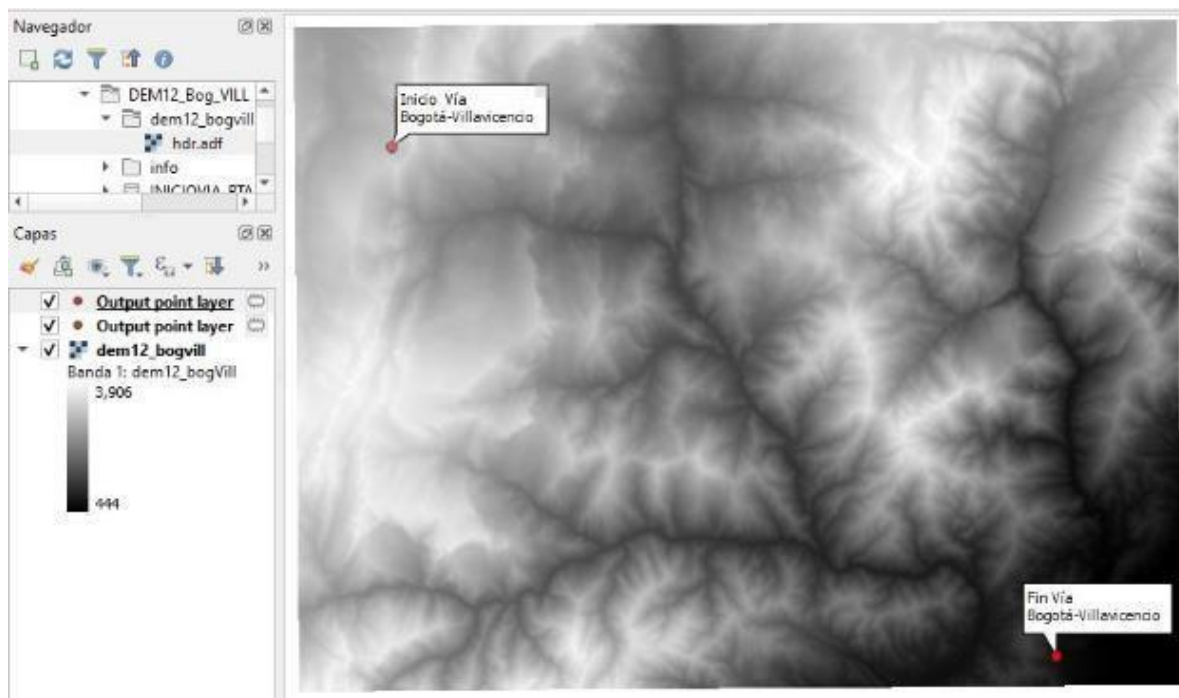
Los datos de elevación que usaron fueron cuadrícularon a escalas de 2, 4, 10, 30 y 90 m para generar una serie de paisajes simulados, usaron en el criterio de O'Loughlin (1986) para predecir zonas de saturación superficial y en TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1979) para simular hidrogramas y determinaron que un tamaño de cuadrícula de 10 m proporciona una mejora sustancial sobre los datos de 30 y 90 m, pero los datos de 2 o 4 m proporcionan solo una mejora adicional marginal para la topografía de pendiente moderada a empinada de nuestras áreas de estudio. Nuestros análisis sugieren que, para muchos paisajes, un tamaño de cuadrícula de 10 m presenta un compromiso racional entre aumentar la resolución y el volumen de datos para simular procesos geo morfológicos e hidrológicos. Muchos paisajes, un tamaño de cuadrícula de 10 m presenta un compromiso racional entre aumentar la resolución y el volumen de datos para simular procesos geo morfológicos e hidrológicos. El DEM permite reconocer mediante observación y hacer análisis de acuerdo a la gama de tonalidades grises que presenta, las zonas claras corresponden al terreno con menores alturas o cotas iniciando en 444 y las zonas de mayor contraste con altura o cota de 3906.

4.6 Georreferenciación y Uso de Ortofoto.

Para el análisis del sector se debe tener georreferenciado cada uno de los insumos y productos de los que se haga uso, de esta manera se garantiza la relación de ubicación

concordante en espacio de cada elemento. QGIS además permite orientar visualmente mediante los complementos del QuickMapServices con las extensiones de Bing, ESRI y Google; se trabaja con Google satélite para el caso y georreferenciación Magna-Sirgas / Colombia Bogotá Zone.

Figura 4.6.1 DEM extraído de la vía Bogotá - Villavicencio.



Nota. DEM extraído cubriendo únicamente el área de estudio. Adaptado de QGIS 3.24.3

4.7 Procesamiento de la Información en QGIS.

Así como es de gran importancia elegir la información que se va a procesar para obtener el flujo de acumulación, también es indispensable conocer que productos se desean obtener para el análisis. Se debe tener claridad que mapas son los que contienen la información para que no quede pendiente el análisis de algún elemento que proporcione datos concluyentes; pero que tampoco contenga información sin uso y que emplee un esfuerzo adicional sin justificación.

A partir de esto se tiene como insumos:

- Las áreas con posible afectación de flujo de acumulación traducidas mediante polígonos extraídos de Google Earth y en formato KML para el geoprocesamiento de QGIS.
- Modelo de Elevación digital de la zona, que contiene toda la información en una capa para traducirla en flujo de acumulación.
- Shapefile, aplica como insumo para las fases posteriores del procesamiento, ya que estos cumplen la indispensable función de almacenamiento digital de forma vectorial en el que se contiene atributos de los elementos geográficos. Se generan por cada una de las UGI a analizar y por consiguiente está delimitada y contiene la información al área precisa que fue extraída.
- El DEM extraído es parte del geoprocesamiento y cuenta como insumo para la generación del flujo de acumulación por cada una de las UGI delimitadas, este archivo raster contiene con datos de alturas reales de cada uno de sus pixeles para todas las UGI o sitios con posible riesgo de deslizamiento seleccionados y es la que se va a llevar al SAGA GIS 7.8.2 complemento del QGIS 3.24.3.

Como producto se tiene:

- Cada uno de los de los modelos de elevación digital (DEM) con depresiones llenas o corregidas por cada UGI seleccionada.
- Dirección del flujo.
- Y finalmente el flujo de acumulación.

Proceso de obtención de productos que se describe detalladamente a continuación.

4.8 Aplicación de la Técnica de Acumulación en SAGA.

Una vez se tienen extraídas las áreas de acuerdo a las Unidades de comportamiento Geomecánico Independiente (Figura 4.8.1), se procede a llevarlas al SAGA- (System for Automated Geoscientific Analyses), el cual es un sistema para análisis automatizado geocientífico de código abierto utilizado para editar y analizar datos espaciales y perteneciente a los Sistema de Información Geográfica (SIG).

Este sistema está dirigido principalmente a la geografía física, debido a al origen, puesto que sus creadores son investigadores especializados en la rama de la geografía; también dicho software alberga bloques de funciones más importantes que van enfocados hacia cálculos hidrológicos y geomorfológicos mediante el soporte, lógicamente, de modelos digitales del terreno.

Figura 4.8.1 DEM, Sitio 21 - K58 de la vía Bogotá – Villavicencio.

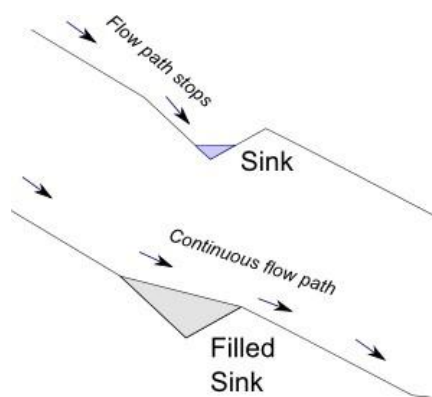


Nota. DEM extraído, de acuerdo a UGI: Sitio 21 perteneciente al K58 de la vía Bogotá – Villavicencio Adaptado de QGIS 3.24.3.

SAGA no es un sistema especializado en gestionar y procesar imágenes de satélite, pero si contiene un bloque de funciones, básico pero muy útil en la técnica de la teledetección, el cual permite realizar una serie de cálculos que pueden ir desde la composición, pasando por índices de vegetación y llegando incluso, hasta la transformación de los valores digitales de una imagen satelital a reflectividad o temperatura. También puede procesar y arrojar algoritmos de crecimiento rápido de región, análisis de riesgo de incendio, morfometría del terreno y finalmente entre sus herramientas está el complemento hidrológico, el cual es el aplicado en la obtención del flujo de acumulación y otros complementos que permiten la simulación de otros procesos hidrológicos como redes de canales y cuencas de drenaje.

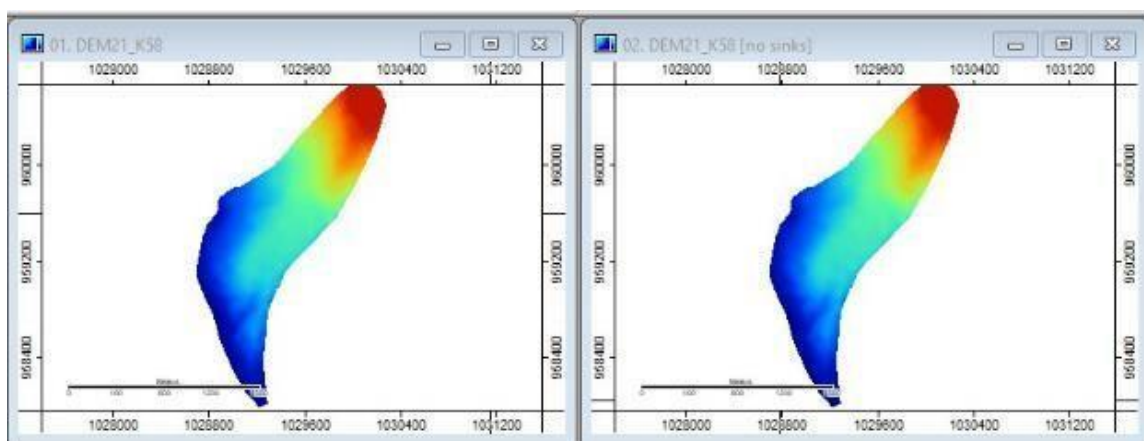
Ya con los DEM determinados por cada UGI y llevados al SAGA, se debe corregir hidrológicamente (Figura 4.8.2.), es decir llenar todos aquellos sumideros o depresiones que son errores DEM original, para producir modelos de flujo hidrológico, es decir se requiere producir un conjunto de datos de elevación libre depresiones que puedan capturar el flujo de agua que representa errores mínimos del DEM. Esto se hace ejecutando el proceso en el programa Terrain Analysis>Preprocessing>Fill Sinks (Wang Liu), pues se debe llegar a eliminar posibles errores numéricos, es decir los cuerpos de agua en la superficie terrestre tienen un inicio y un fin, que va acorde a la topografía; y en muchas ocasiones los DEM tienen errores en los que pareciese que los cuerpos de agua condujesen algún tipo de sifón, situación que no es muy común en la realidad. También se genera el mapa dirección de flujo durante el mismo proceso. La figura 4.8.2 es un ejemplo de un modelo con un 'Fregadero' y la misma superficie después de llenar los 'Fregaderos' y el flujo terrestre es continuo. Esto lo determina el programa y lo plantea como un paso para corregir errores en el DEM.

Figura 4.8.2 Etapa de pre procesamiento, llenado de sumidero.



Nota. Para producir modelos de flujo hidrológico, necesitamos producir un conjunto de datos de elevación libre de 'sumideros' o depresiones anómalas que capturen el flujo de agua. Tomado de *Saga GIS tutorials Preprocessing and catchment deliniation, Blog en WordPress.com* (<https://sagatutorials.wordpress.com/preprocessing-and-catchment-deliniation/>).

Figura 4.8.3 Vista del SAGA del DEM original y DEM sin sumideros.

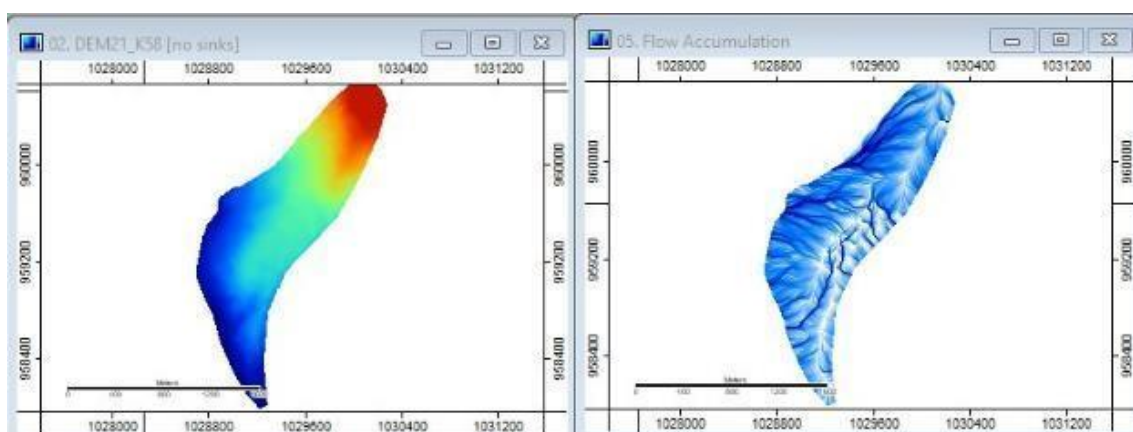


Nota. Ventanas arrojadas del proceso interno ejecutado por el SAGA en las que la imagen de la izquierda es el DEM extraído de la UGI y el de la derecha como muestra en la parte superior de la ventana (no sinks) es ya habiéndole aplicado el *Fill Sinks* Adaptado de *SAGA GIS 7.8.2*.

El DEM sin depresión, no Sinks (Figura 4.8.3), obtenido se usa como entrada para calcular el mapa de flujo de acumulación (Figura 4.8.4), efectuado mediante la herramienta Flow Tracing la cual rastrea el flujo de cada celda en un DEM por separado hasta que sale del DEM o termina en un sumidero, así mismo calcula el peso acumulado de las celdas que fluyen en cada celda de pendiente descendente en el modelo ráster, teniendo en cuenta la dirección del flujo. Este es entonces el proceso hidrológico que describe la tendencia de un área a acumular agua determinando el tamaño del área pendiente arriba que drena en una célula siendo este último el producto requerido para poder analizar las condiciones del flujo del agua de las zonas a evaluar.

Este flujo de acumulación es llamado en el QGIS donde se realiza el análisis por cada sitio con posible afectación, determinando por interpretación visual y análisis cuantitativo que a mayor valor de flujo de acumulación se observa la mayor densidad de drenaje y por el contrario aquellas zonas con menor valor, tiene un tono más claro que indica menor red de corrientes.

Figura 4.8.4 Flujo de acumulación hallado en SAGA, para sitio 21-K58 de la vía Bogotá – Villavicencio.



Nota. Proceso interno del SAGA en el que se aplica el Flow Accumulation y resulta la ventana mostrada en la figura derecha, agrupando áreas con valores con tendencia a acumular

agua determinando el tamaño del área pendiente arriba que drena. Adaptado de *SAGA GIS* 7.8.2.

4.9 Análisis del Flujo de Acumulación en QGIS.

Se exporta el mapa final obtenido del SAGA al QGIS (Figura 4.9.1), pues en este último se tiene por cada uno de los sitios con posible afectación por flujo de acumulación las capas en las que se observan los factores que se vinculan al fenómeno de deslizamiento como lo son: uso del suelo, vegetación, relieve, altura, cuerpo de agua, localización de la vía en estudio.

En este punto ya se debe iniciar el análisis del flujo de acumulación y para esto se requiere empezar con el sitio más crítico, el cual es el que permite conocer cuál es el valor de flujo de acumulación máximo presente en un deslizamiento; el sitio crítico, determinado después de aplicar los criterios de susceptibilidad, estado de los movimientos en masa y efectos causados por mismos, indica que es el sitio más crítico es un deslizamiento activo y que nos permite ver también si el talud está dominado por la presencia de un lomo, camino real, sequia o vía superior que ha conllevado a generar el movimiento en masa. Así que los rangos estipulados son valores de pixel (value pixel).

Se analizan los rangos en los que se pueden agrupar los valores de los pixeles encontrados en el flujo de acumulación dependiendo la orientación que se quiera tomar, pues con este se pueden construir mapas hidrológicos, clasificar en rangos de importancia cuerpos de agua en las cuencas, drenajes, subdrenajes.

Pero en el caso de estudio, determinar la cantidad de flujo que acumula cada celda mediante el método de dirección y flujo acumulado, tiene como orientación ser un criterio que va indicar el índice de propensión del terreno a sufrir movimientos en masa y determinar los sitios críticos; es decir, hallar el valor de los pixeles dentro de un rango que exponga que sitios pueden estar propensos a sufrir un deslizamiento.

Figura 4.9.1 Flujo de acumulación exportado de SAGA a QGIS.



Nota. Capa que contiene la información del flujo de acumulación determinado en el SAGA, esta visual es como queda al cargarla al QGIS. Adaptado de QGIS 3.24.3.

Aplicada la técnica del flujo de acumulación al punto más crítico del corredor vial, se ha hallado el punto de calibración, pues este al encontrarse dentro del entorno con todos los factores generalizados por los que es afectado el terreno como lo son las precipitaciones, clima, pendiente, tipo de material y demás, representa el comportamiento geomecánico de todo su alrededor y es posible estimar puntualmente bajo las mismas condiciones, la influencia del flujo de acumulación en la ocurrencia de deslizamientos a lo largo de un corredor.

Precisado el sitio que funcionará como punto de calibración (Figura 4.9.2), en el QGIS se empieza a analizar la manera de representar el ráster, proceso por el cual el software a los píxeles les asigna un color según la rampa de color seleccionada y la leyenda de la capa. De

forma predeterminada, QGIS informa los valores de la banda del ráster y se debe tener en cuenta que valores muy bajos o altos pueden tener un impacto negativo en la representación del ráster.

Figura 4.9.2 *Deslizamiento Meseta Mesagrande K58 de la Vía Bogotá – Villavicencio.*



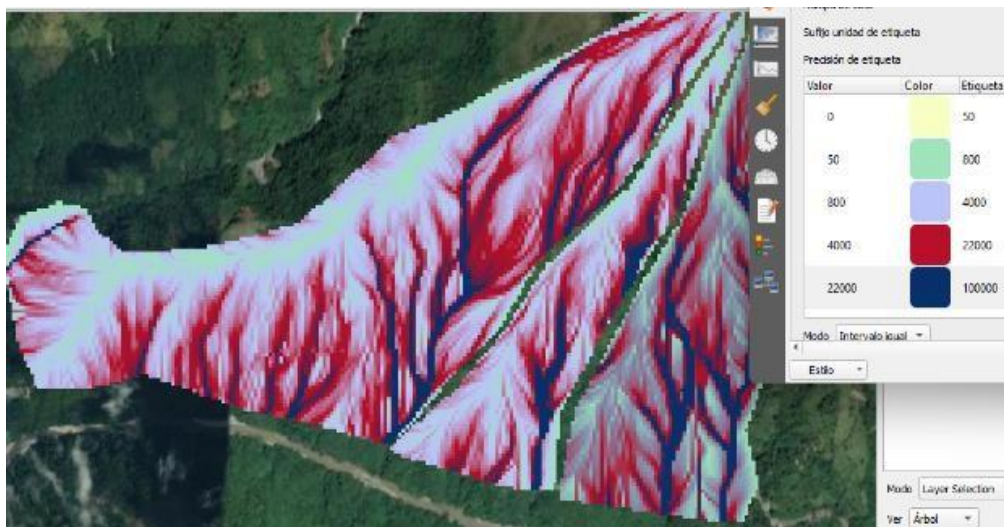
Nota. Deslizamiento presentado sobre el K58 de la Vía Bogotá – Villavicencio. Tomado de *El Universal Nueva fecha: vía al Llano se reabrirá este martes.*

(COLPRENSA, 2019) (<https://www.eluniversal.com.co/colombia/nueva-fecha-via-al-llano-se-reabrira-este-martes-AX1734615>).

Además de asignar un color a cada pixel, este método se puede utilizar para clasificar y representar conjuntos de datos en función de sus valores. Dada una rampa de color y un número de clases, genera entradas de mapas de colores intermedios para los límites de clase. Cada

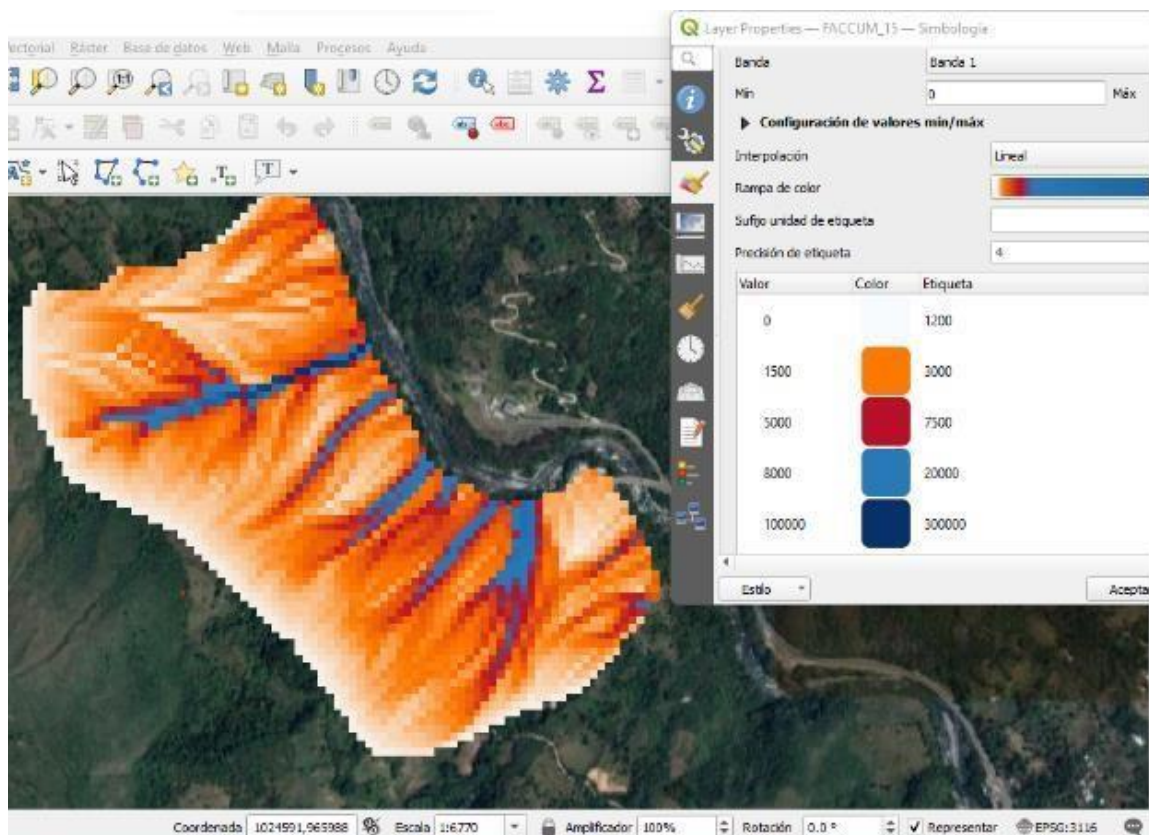
color se representa con un valor interpolado a partir de un rango de valores y según un modo de clasificación. Así entonces, a los elementos del conjunto de datos se les asigna su color en función de su clase; es decir, inicialmente y solo para hacer la calibración del modelo se diseña la banda que permite el análisis, iterando los rangos con gamas de colores que logren mostrar el flujo de acumulación que abarca la mayor parte del movimiento en masa del sitio crítico, como se expone en las Figuras 4.9.3 y 4.9.4. El proceso se lleva a cabo colocando valores para ver cómo se puede visualizar mejor el rango que representa riesgo de deslizamiento. En este caso el rango alto de propensión a sufrir un deslizamiento, rango propuesto entre 4000 – 22000 (Figuras 4.9.3), es muy amplio y existe la posibilidad de identificar cuerpos de agua como zonas de propensión, puesto que al identificarlo en campo o mediante google earth, se verifica que dichos cuerpos de agua están siendo identificados como zonas de amenaza (color rojo) y en realidad estas zonas identificadas como amenaza corresponde a quebradas o riachuelos

Figura 4.9.3 Diseño de rango de *flujo de acumulación crítico*, valores entre 4000 y 22000.



Nota. Adaptado de QGIS 3.24.3. Rango de calibración en el que se propuso que las zonas con alta propensión de movimiento en masa, pertenecía a las áreas que evidenciaban flujo de acumulación entre 4000 – 22000.

Figura 4.9.4 Diseño de rango de flujo de acumulación crítico, valores entre 5000 y 7500.



Nota. Se aumenta el valor del que parte el rango que se va a determinar cómo nivel alto de propensión y se disminuye la amplitud del rango quedando así: 5000 a 7500 píxeles, pero se observa que realmente no representa ningún sitio como amenaza, puesto que solo se observa zonas con riesgo a áreas circundantes de cuerpos de agua y la zona del deslizamiento no es tomada por el rango determinado para propensión alta. Adaptado de QGIS 3.24.3.

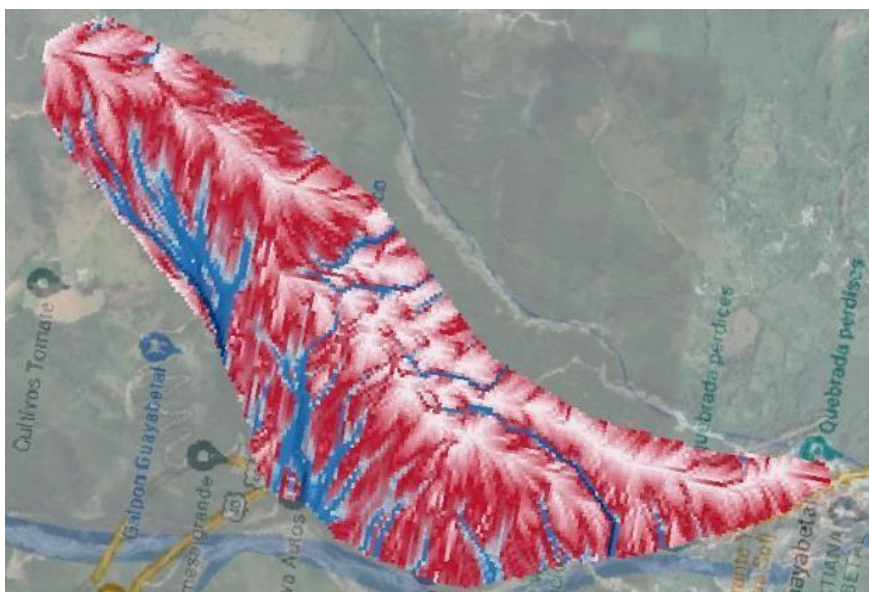
Mediante varias iteraciones se determina el rango más apropiado es el expuesto en la Figura 4.9.5 pues existen puntos en los que hay propensión de ocurrir movimientos en masa ($1500 < F.A < 3000$); como también existen sitios dentro del deslizamiento que han formado zonas muy profundas que permite el escurrimiento libre del agua ($F.A > 3000$), estas zonas en casos particulares requieren un análisis visual en campo o en el google earth más detallado para determinar a que corresponde.

Figura 4.9.5 Ventana arrojada por Qgis en la que se estableció rango definitivo para análisis de zonas con riesgo de afectación por flujo de acumulación.

Valor	Color	Etiqueta
0		1200
1500		3000
5000		7000
7500		20000
100000		300000

Nota. Rangos para el análisis determinar las zonas con propensión alta a presentar movimientos en masa. Adaptado de QGIS 3.24.3.

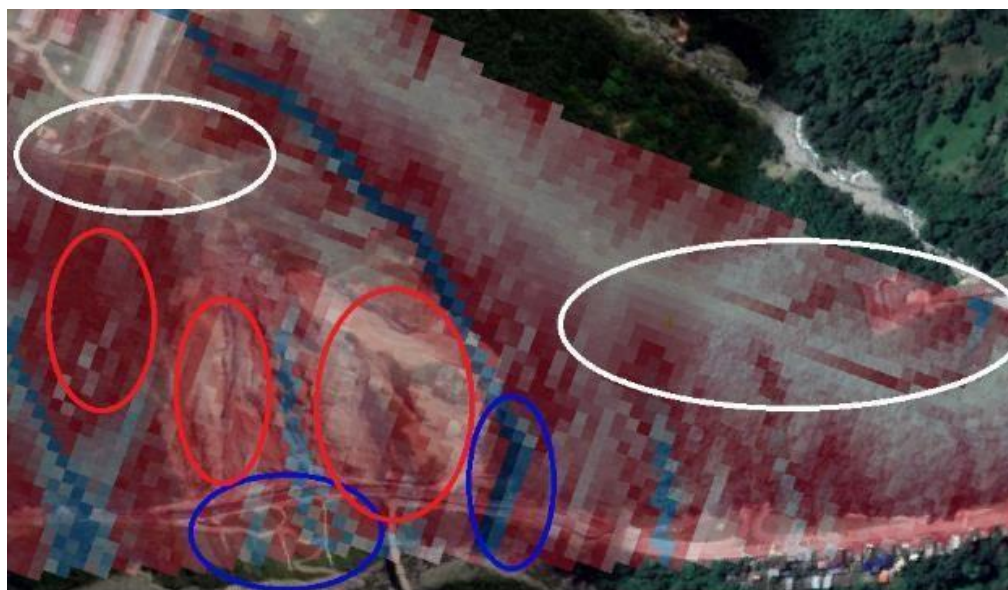
Figura 4.9.6 Vista de UGI con rampa de tonos que define las condiciones del terreno teniendo en cuenta el rango para pixeles entre $1500 < F. A < 3000$.



Nota. Corresponde al resultado de cargar la rampa de color determinada para zonas con propensión a sufrir movimientos en masa o deslizamientos acordes a los rangos definitivos y expuestos en la figura 4.9.5. Adaptado de QGIS 3.24.3.

Entonces se tiene como resultado el rango más apropiado para representar el flujo de acumulación que causa movimientos de grandes volúmenes de material en el sitio crítico y se comprueba que no solo este rango pone en evidencia el flujo de acumulación y determina las áreas altamente propensas a presentar movimientos en masa (Figura 4.9.7) encerrado en los círculos rojos, sino que además la paleta determinada para analizar este ráster es capaz de mostrar con los tonos azul y azul oscuro aquellos sitios en los que se presentan cuerpos de agua natural u obras hidráulicas existentes, se considera el rango inicial de 0 a 1200, de tonalidad blanca, representando el rango en el que esa área tiene un flujo acumulado muy bajo, y finalmente se debe hacer análisis visual en earth o en campo de los sitios representados por el tono azul más claro, ya que puede representar cuerpos de agua menores como quebradas o áreas muy profundas del deslizamiento presentado que puedan llegar a conducir agua.

Figura 4.9.7 Observación de rango de calibración en el modelo.



Nota. La capa que contiene el flujo de acumulación se sobrepone a la imagen satelital para calibrar el modelo. Adaptado de QGIS 3.24.3.

Encontrado el rango de calibración; se guarda este estilo, se aplica a otros deslizamientos para hacer el mismo proceso de calibración y corroborar que los rangos correspondan a lo descrito en la categorización. Se establece la categorización de los rangos de los flujos de acumulación tabla 4.9.1 para posteriormente, en el QGIS, agregar el estilo y cargar a los ráster de flujo de acumulación de cada una de las unidades de comportamiento geomecánico independiente que se tomaron.

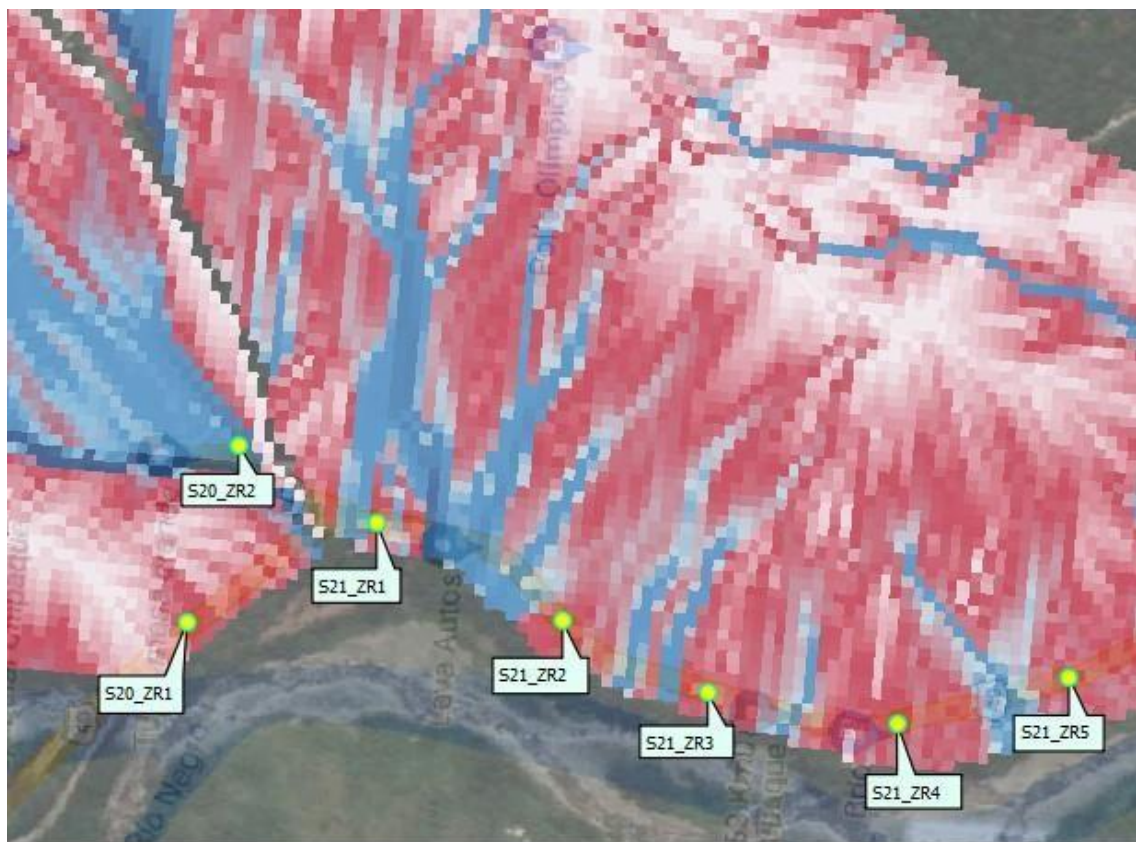
Tabla 4.9.1 Categorización de los rangos del flujo de acumulación.

RANGO FLUJO DE ACUMULACIÓN (Valores de pixel)	BANDA	CATEGORIA
0 1200		Área estable.
1500 3000		Área de propensión alta a sufrir movimientos en masa.
5000 7000		Rango de análisis para determinar huellas profundas del deslizamiento o zonas con presencia evidente de cuerpos de agua.
7500 20000		Quebradas y riachuelos.
100000 300000		Ríos.

Nota. Categorización de los rangos arrojados de acuerdo al flujo de acumulación mediante la aplicación de la técnica y se determina que representan. Los valores arrojados por QGIS son valores de pixel y funciona para hacer comparativas de los rangos de pixeles de las diferentes áreas del raster.

Se identifican a través de anotaciones de texto (Figura 4.9.8) por cada UGI, todos aquellos los sitios con posibilidad de desencadenar movimientos en masa y que intercepten la vía en estudio.

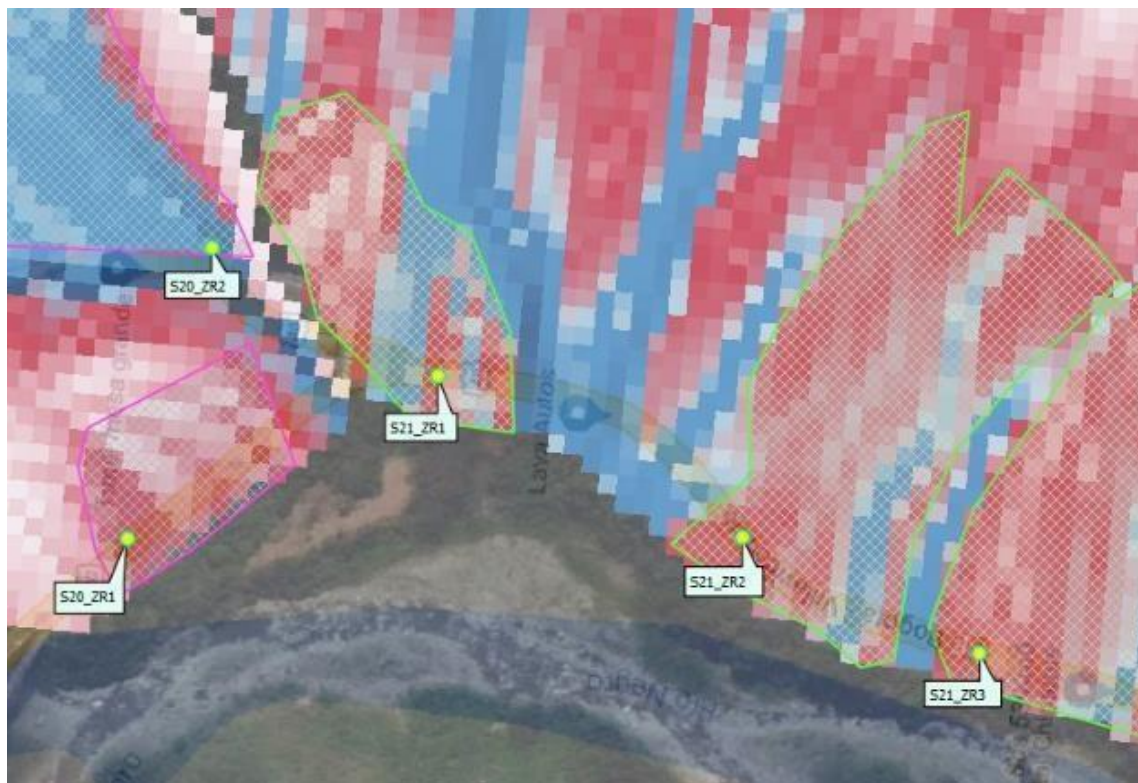
Figura 4.9.8 UGI con anotaciones de texto de aquellos sitios con alta propensión de desencadenar movimientos en masa.



Nota. Sitios etiquetados con **S** (sitio) # de la UGI _ Zona de Riesgo y # de la posición que le corresponde dentro de la UGI en estudio. Adaptado de QGIS 3.24.3.

Ahora, conociendo que cada píxel de la imagen ráster obtenida almacena el tamaño del flujo acumulado, se poligonizan (Figura 4.9.9) todos aquellos puntos en los que se reúnan un conjunto de píxeles del tamaño correspondiente a las zonas que se encuentren entre 1500 y 3000 o se consideren de alta propensión a sufrir eventos de deslizamientos.

Figura 4.9.9 Zonas de Riesgo sectorizadas.

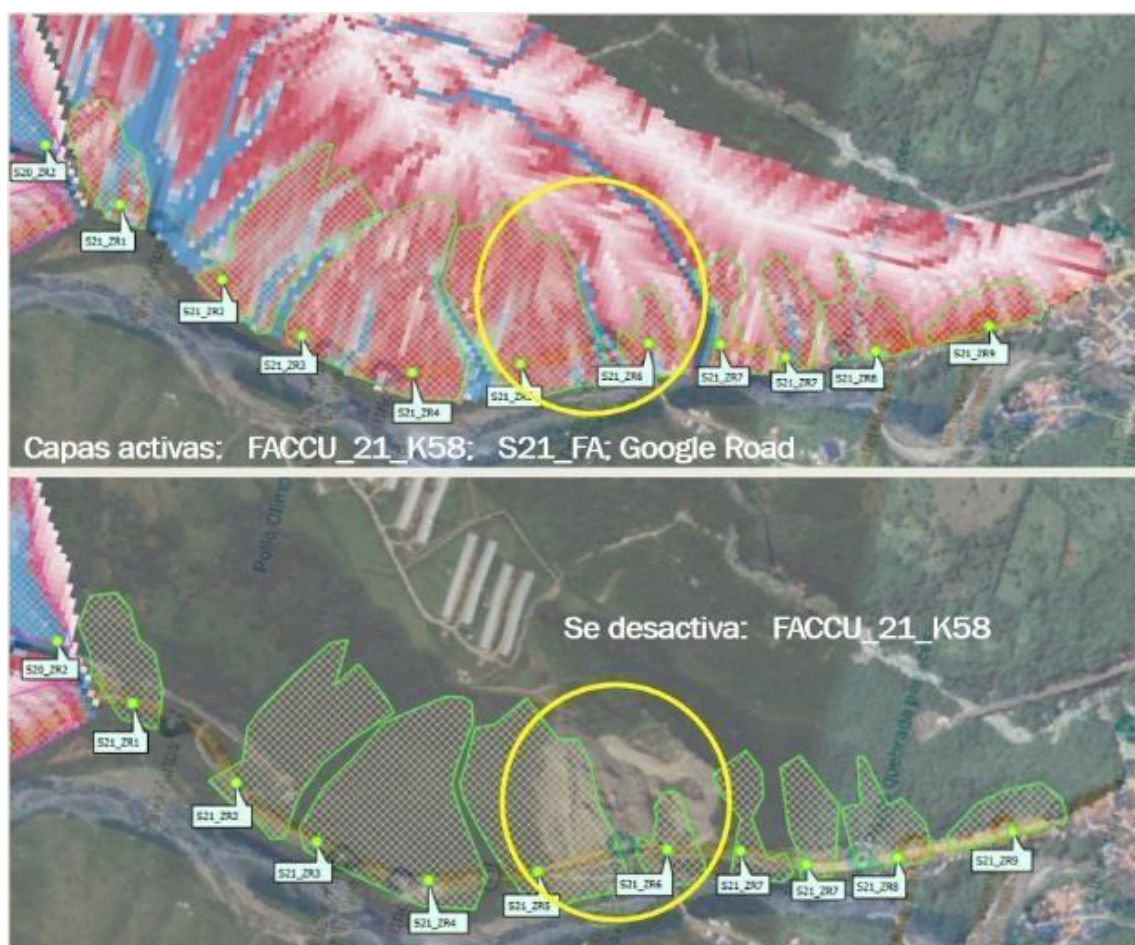


Nota. Para cada UGI se personalizan de manera homogénea todas las zonas de riesgo o polígonos definidos, puesto que los resultados se obtienen por interpretación visual y de ese modo es de mayor entendimiento. Adaptado de QGIS 3.24.3.

Al hacer la sectorización y con la vista satelital en QGIS, también se observan disipadores canales, quebradas, riachuelos y demás cuerpos de agua que estaban representados como sitios probables de nuevos eventos de deslizamiento y que no debían ser tomados como amenaza, si no que se deben analizar de manera independiente con Google Earth con el fin de determinar si realmente hacen referencia a un cuerpo de agua, estructuras de drenaje, a un lugar extremadamente susceptible a eventos de movimientos en masa o a áreas profundas donde discurre flujo dentro del deslizamiento (Figura 4.9.10). Esto como proceso final para tener el análisis en conjunto de las variables que se puedan presentar. Por otra parte, al poder identificar

en campo que estos sitios con flujo de acumulación superior a 3000 se encuentran con el mismo nivel del relieve y son estructuras de drenaje superficial, se valida la técnica de QGIS por representar el flujo de acumulación de un área, puesto que no es solo una representación gráfica del relieve, si no determina la capacidad que tiene una celda de acumular flujo.

Figura 4.9.10 Interpretación visual de puntos con $F.A > 3000$.

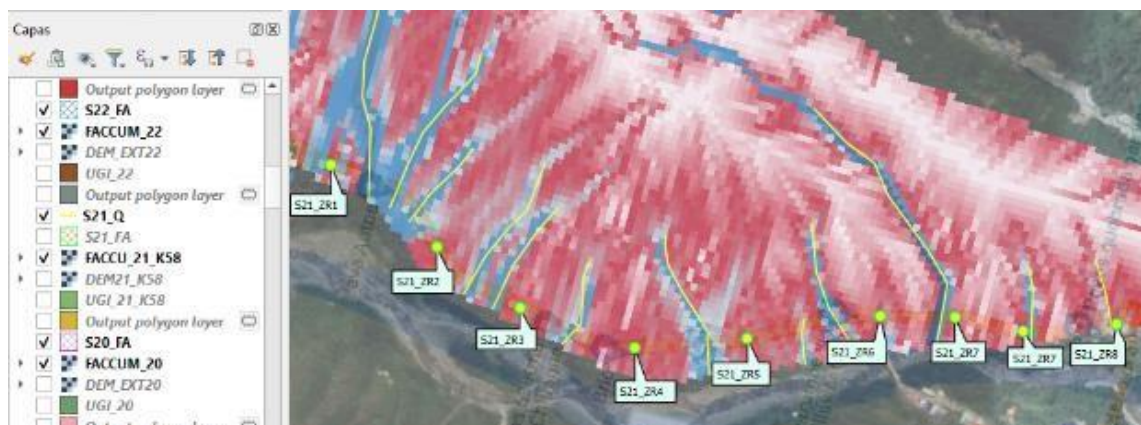


Nota. Poligonización de puntos en los que se reúnan un conjunto de píxeles del tamaño correspondiente a las zonas que se encuentren entre 1500 y 3000 o se consideren de alta propensión a sufrir eventos de deslizamientos. Circulo de color amarillo corresponde al sitio crítico (K58 de la via Bogotá-Villavicencio). Adaptado de QGIS 3.24.3.

Para el caso de la UGI que abarca el K58 se muestra dicha situación, no se poligonizo zona donde se ve más profundo el deslizamiento ya que mostraba pixeles superiores a 3000; pero si se observa sin la capa de flujo de acumulación que esos pixeles donde el flujo es mayor a 3000 no corresponde particularmente a una quebrada, ríos u obras hidráulica y por el contrario si hace parte del deslizamiento, solo que indica que este ha dejado una profunda huella en la que pueden discurrir fluidos. Así también, en este punto de calibración se debe tener en cuenta que se hace con el fin de poder determinar qué áreas tienen una alta propensión de sufrir un deslizamiento desde el concepto de flujo de acumulación a un talud con el movimiento en masa presente, es por esto que se trata de llegar a representar con tonalidades lo más real al deslizamiento y existen áreas que tienen bajo flujo puesto que primero se analiza desde un modelo de fecha anterior y segundo, puede no tener un alto flujo en ese punto, pero si las áreas contiguas se mueven por ende esta se puede ver afectada.

Si bien, de acuerdo a lo analizado con este punto de calibración, se determina que se deben demarcar estas líneas de flujo de acumulación superior a 3000 (Figura 4.9.11) con el fin de extraerlas junto con los polígonos al Google Earth e identificar por qué acumulan más de 3000 pixeles (Figura 4.9.12). En la figura 4.9.13 se muestra una de las redes de canales representados por polilíneas y por consiguiente por flujos >3000; así como también un área profunda del deslizamiento representada por polilíneas y por consiguiente por flujo >3000 (Figura 4.9.14).

Figura 4.9.11 Polilíneas para sitios con flujo de acumulación mayor a 3000.



Nota. Polilíneas que identifican áreas con flujo de acumulación superior a los 3000 que se deben analizar de manera independiente con Google Earth con el fin de determinar si realmente hacen referencia a un cuerpo de agua, estructuras de drenaje, a un lugar extremadamente susceptible a eventos de movimientos en masa o a áreas profundas donde discurre flujo dentro del deslizamiento. Adaptado de QGIS 3.24.3.

Con este último proceso se cierra el método para el análisis de los sitios propensos a la generación de deslizamientos en la vía Bogotá Villavicencio desde la vista del flujo de acumulación y se deja como base para la continuación de la metodología con el fin de involucrar más variables que permitan predecir más exactamente los deslizamientos en taludes adyacentes a este y otros corredores viales. En la figura 4.9.15 se consolida en un diagrama el paso a paso para la determinación del flujo de acumulación.

Figura 4.9.12 Polilíneas y polígonos exportados a Google Earth.



Nota. Polilíneas extraídas en el Google Earth que acumulan más de 3000 píxeles junto con los polígonos de las áreas propensas a presentar eventos de movimientos en masa.

Adaptado de *Google Earth*.

Figura 4.9.13 Redes de canales representados por polilíneas y por consiguiente por flujos >3000.



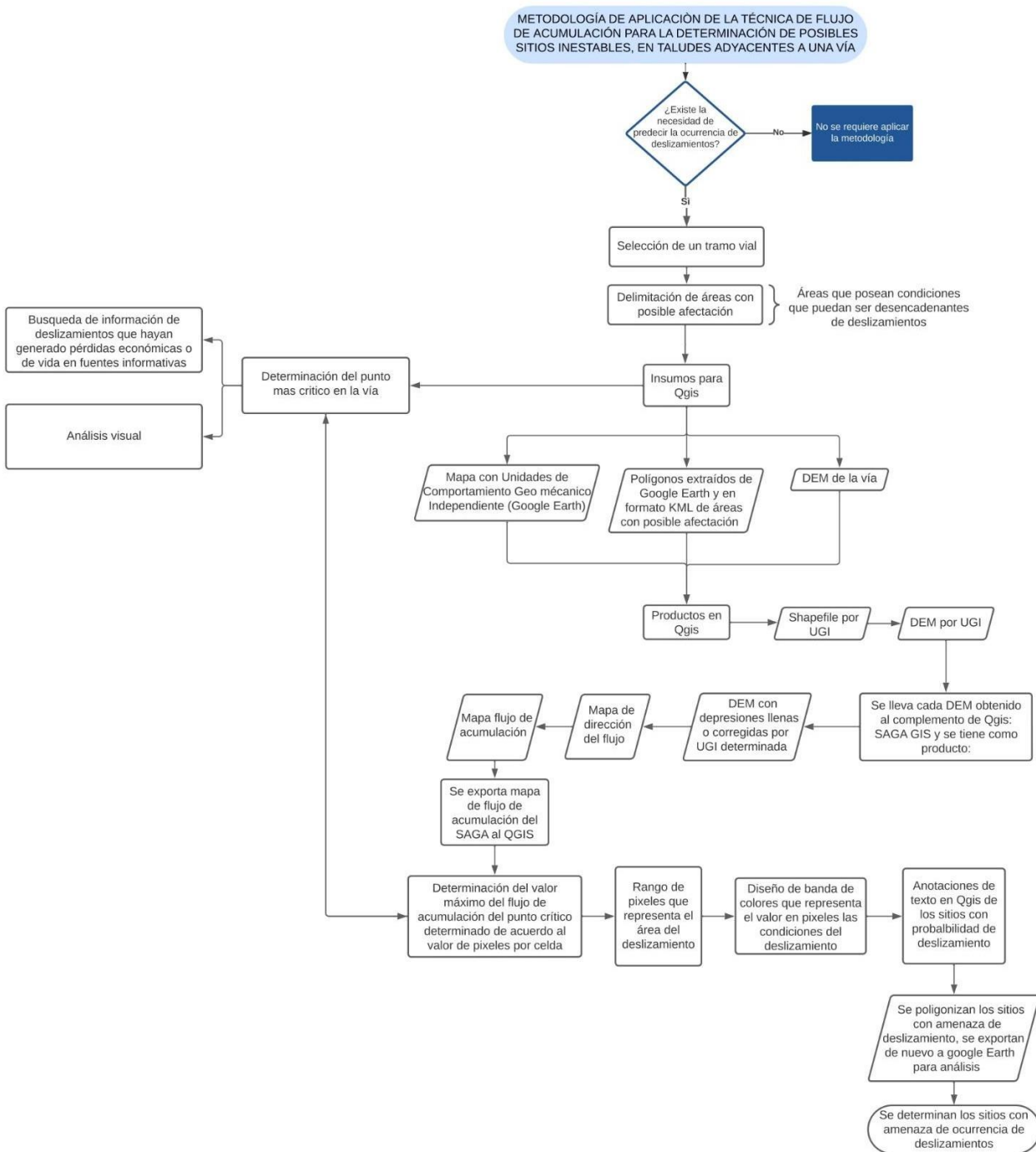
Nota. Obras hidráulicas identificadas con polilíneas que reflejan flujo de acumulación mayor a 3000. Vista adaptada de Street View del *Google Earth*.

Figura 4.9.14 Parte profunda del deslizamiento representada por polilíneas y por consiguiente por flujo >3000



Nota. Las polilíneas representan la parte más profunda del deslizamiento, cuyo flujo de acumulación es superior a 3000 y también representa serie de disipadores y zanjas que se evidencian en campo o en earth. Vista adaptada de Street View del *Google Earth*.

Figura 4.9.15. Esquema conceptual de la metodología.



5. Desarrollo.

El estudio de sitios susceptibles a deslizamientos de la vía Bogotá – Villavicencio permite consolidar un diagrama del paso a paso para el análisis de cualquier punto adyacente a este corredor vial a partir de la aplicación del flujo de acumulación.

Dicho diagrama se ha consolidado a partir de la guía *Determinación de puntos de amenaza de deslizamiento en una ladera con la ayuda del programa QGIS 3.14.1* (Montoya, 2022) y del constante interés por construir conocimiento para determinar zonas susceptibles a movimientos de masa de tierra o rocas.

Se analizan 28 áreas, seleccionadas a partir de la inspección visual de variables; principalmente por cambios definitivos de pendiente o por el modo del uso del suelo; que involucran acciones antrópicas que se llevan a cabo sobre este como la construcción de caminos reales que propician deslizamientos por la ausencia de obras de drenaje longitudinales y que sumado a las condiciones naturales del terreno pueden desencadenar procesos de movimientos en masa. Las áreas, se demarcaron además por estar limitadas por cuerpos de agua natural, pues el terreno comprendido entre estos agrupa las características de ese sector y estas fueron las que se definieron como UGI.

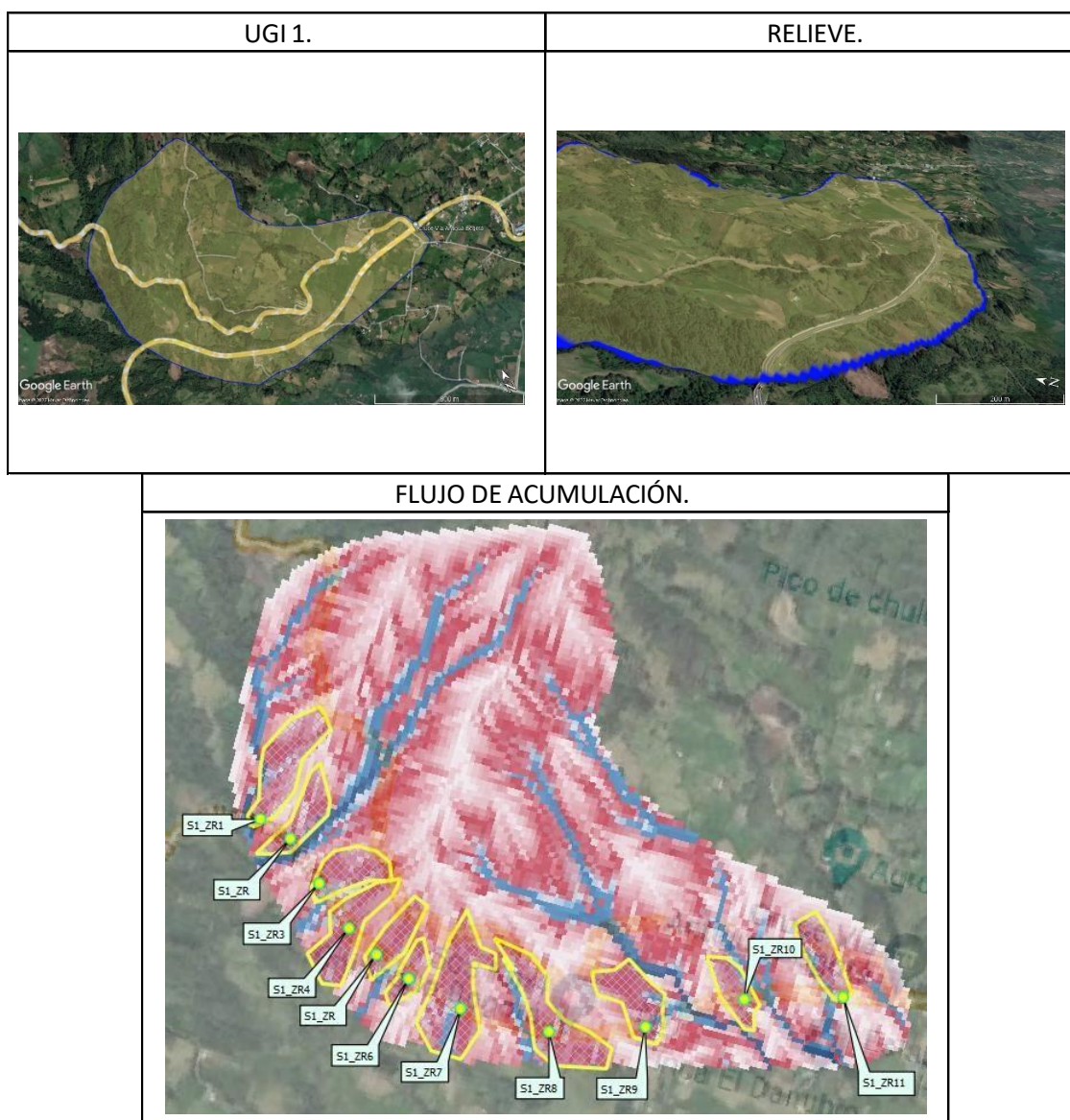
A partir de estas se generan mapas con los posibles sitios de riesgo (S1, S2,...) dentro de cada sitio o UGI, determinándolas mediante la aplicación de la técnica del flujo de acumulación; se poligonizan y se obtiene las zonas de riesgo (ZR1, ZR2,...) delimitadas que presentan puntualmente flujos de acumulación entre 1500 y 3000 en el Google Earth. Para el caso de estudio se hace el análisis puntual de 13 sitios.

Con todas las zonas de riesgo cargadas en el Google Earth se obtienen las imágenes del estado de la vía con el Street View, así como también fotografías tomadas en visita a campo.

Del análisis de las imágenes aéreas a través del tiempo se extraen tomas de los sitios en los que se ha modificado la morfología o uso del suelo en algunos puntos.

También se tienen algunas imágenes generadas en el Google Earth con las líneas que representan flujos de acumulación mayores a 3000 en el QGIS. En este capítulo, se expondrá para cada uno de los sitios, la delimitación de la UGI, el relieve predominante o análisis temporal en Earth o en el Street View, y el flujo de acumulación; en el siguiente capítulo por su extensión se hará el análisis de resultados.

5.1 Sitio 1. (4°27'21.08"N; 74° 3'25.71"O).



ZONAS DE RIESGO - SITIO 1.

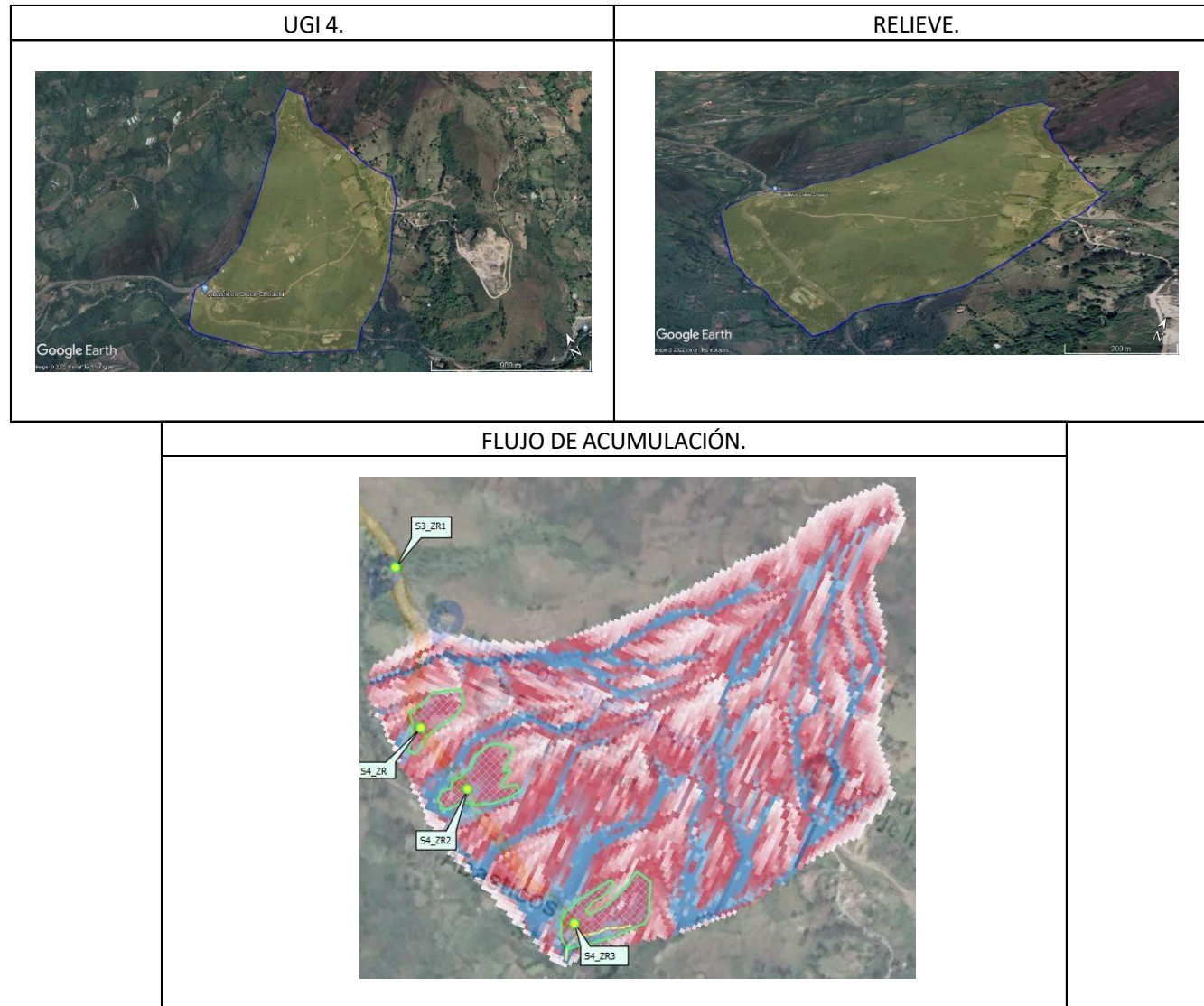


INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO

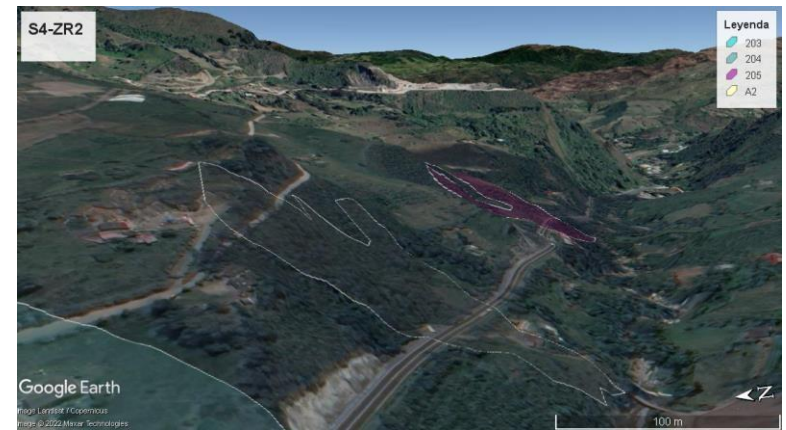


RELIEVE 2016 VS 2020



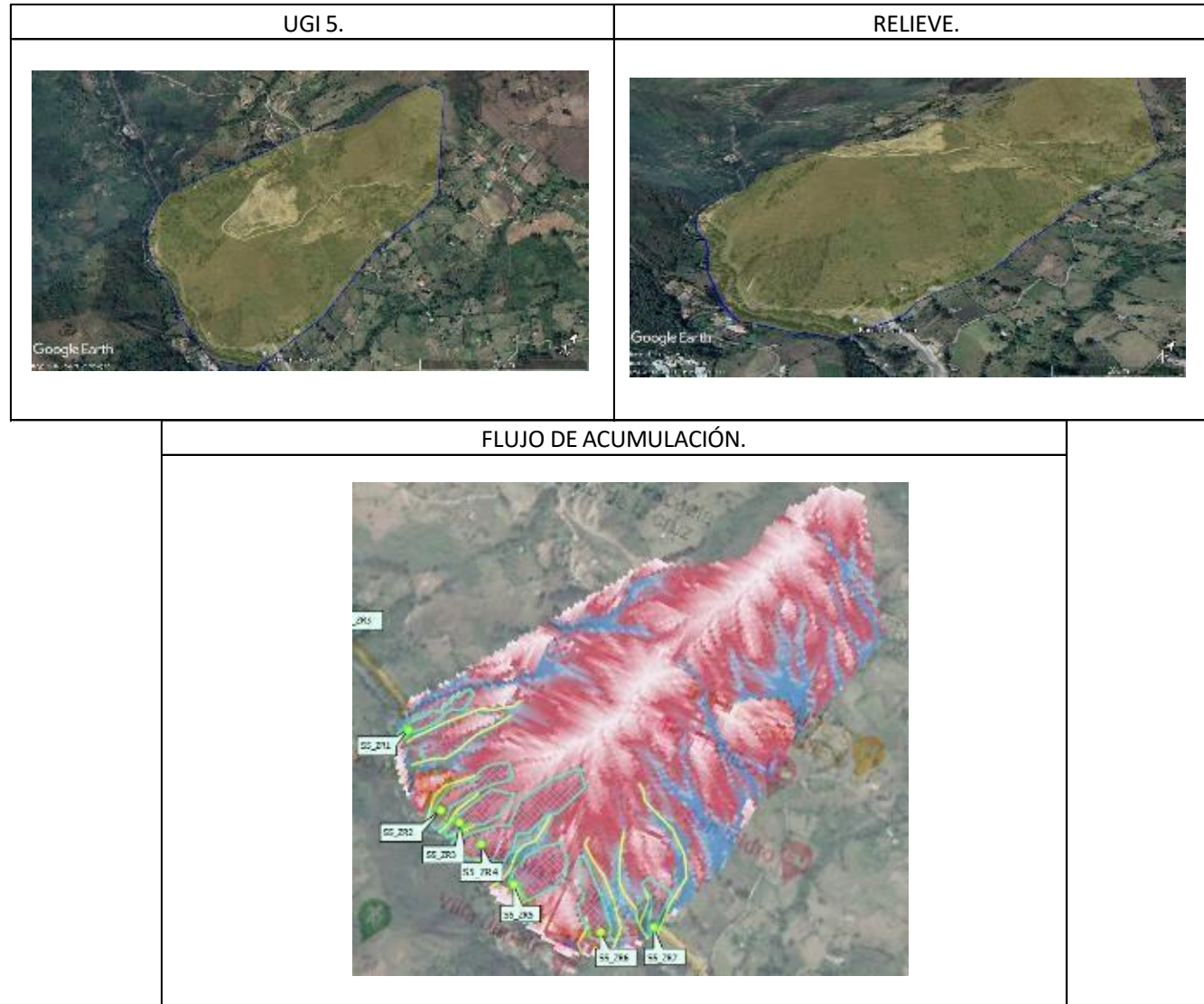
5.2 Sitio 4. ($4^{\circ}25'36.97''\text{N}$; $73^{\circ}59'42.55''\text{O}$).

ZONAS DE RIESGO - SITIO 4.



INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



5.3 Sitio 5. (4°2 5'14.58"N; 73°59'6.16"O).

INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



RELIEVE 2000 VS 2021



ZONAS DE RIESGO - SITIO 6.



INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



RELIEVE 2010 VS 2020

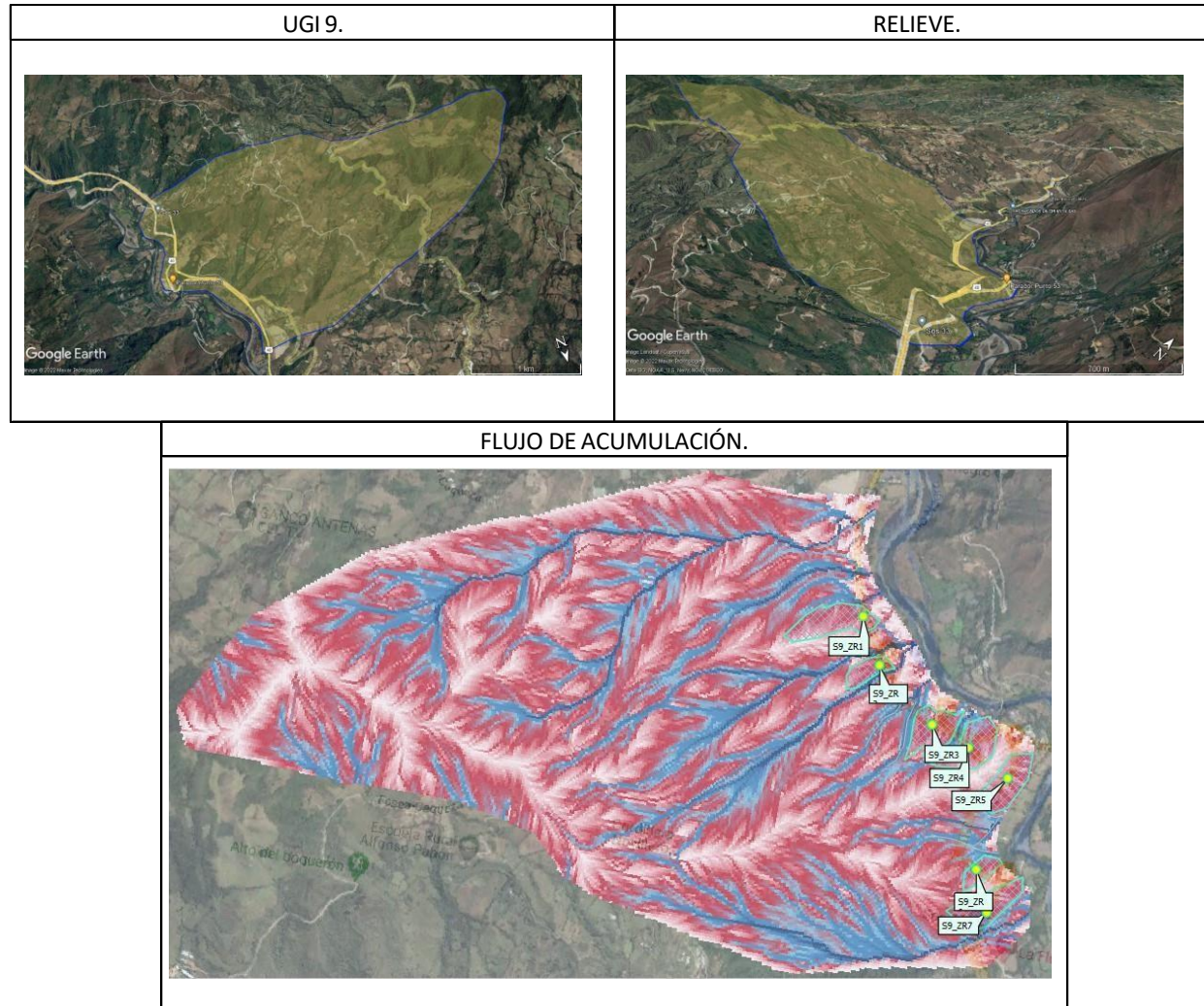


RELIEVE 2017 VS 2018



INSPECCIÓN IN SITU 2022



5.5 Sitio 9. (4°22'22.58"N; 73°54'31.81"O).

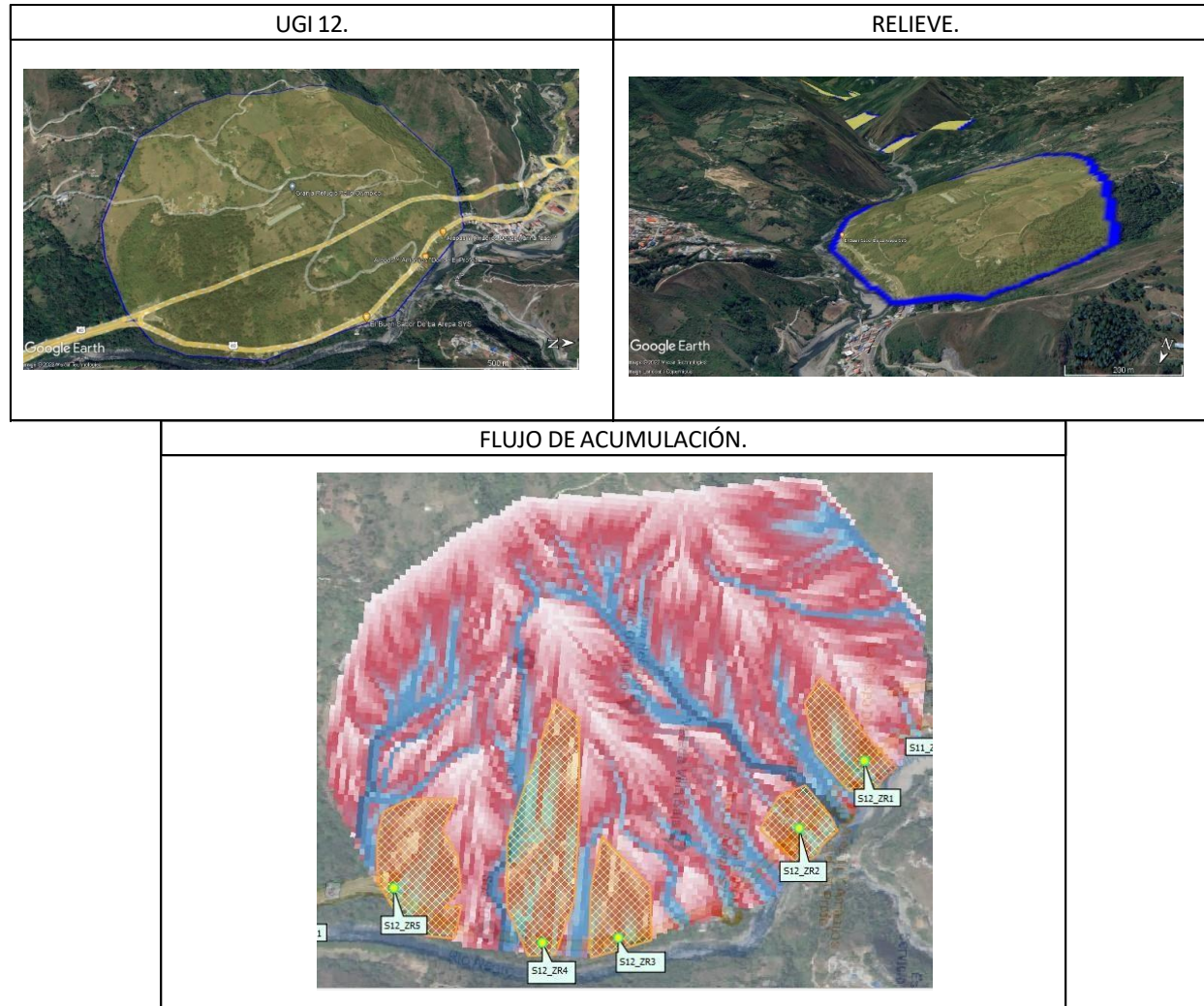
ZONAS DE RIESGO - SITIO 9.



INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



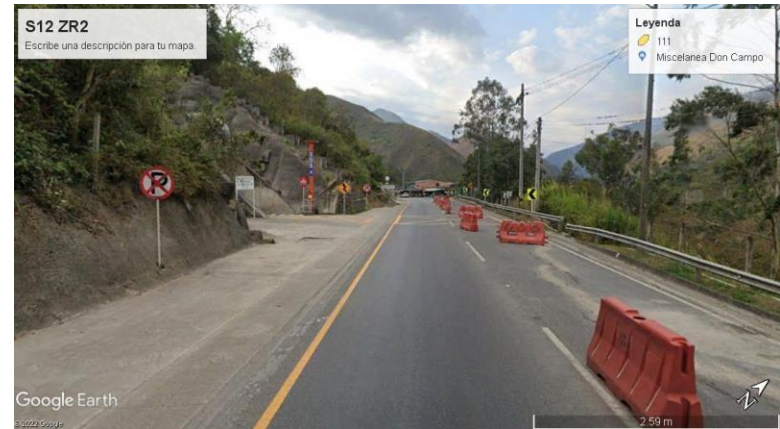
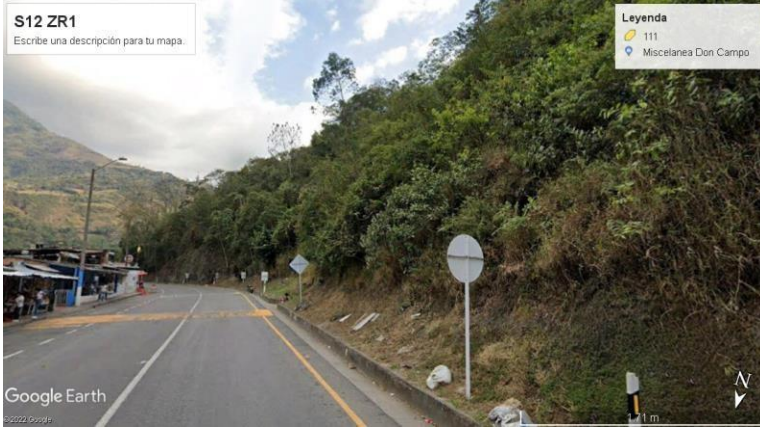
5.6 Sitio 12. (4°19'23.09"N; 73°52'14.67"O).

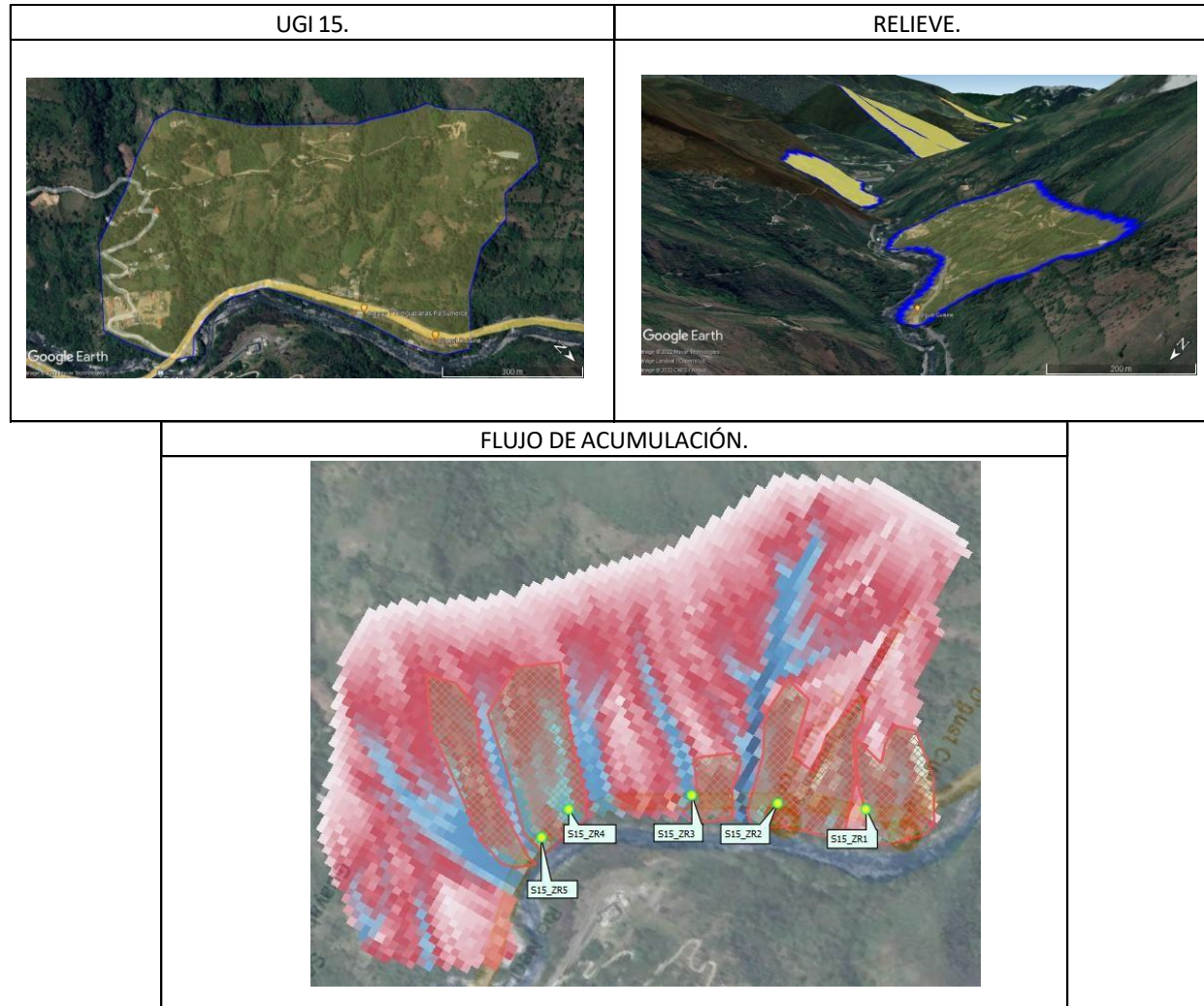


ZONAS DE RIESGO - SITIO 12.



INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO

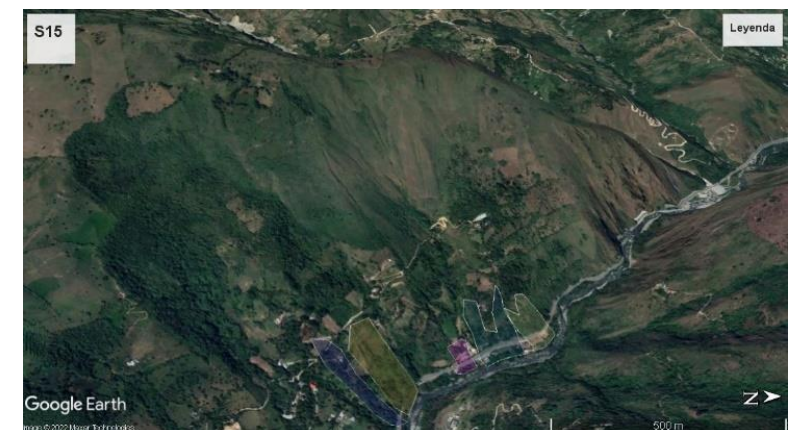


5.7 Sitio 15. (4°17'25.60"N; 73°50'55.79"O).

ZONAS DE RIESGO - SITIO 15.



RELIEVE 2003 VS 2020

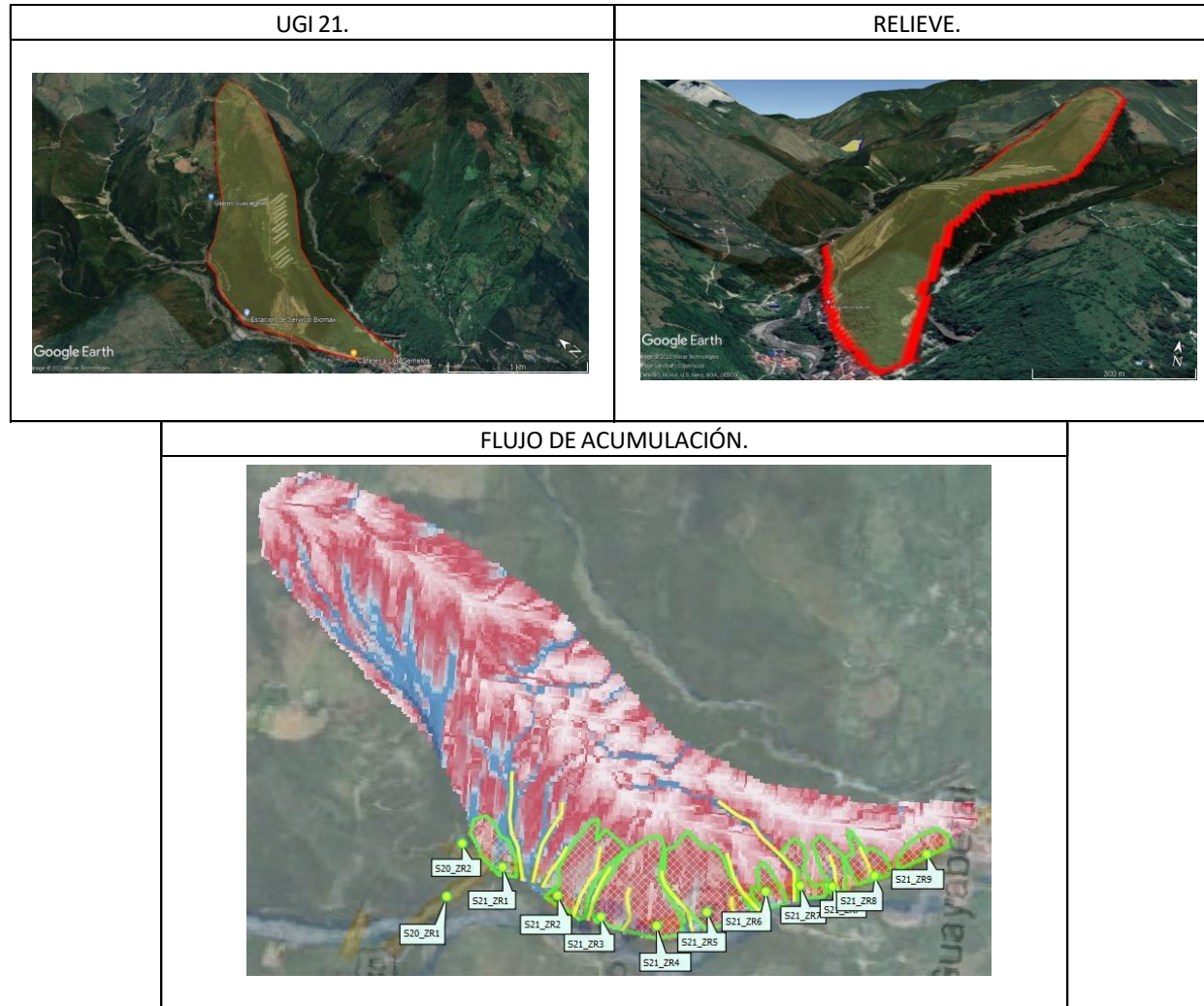


INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO

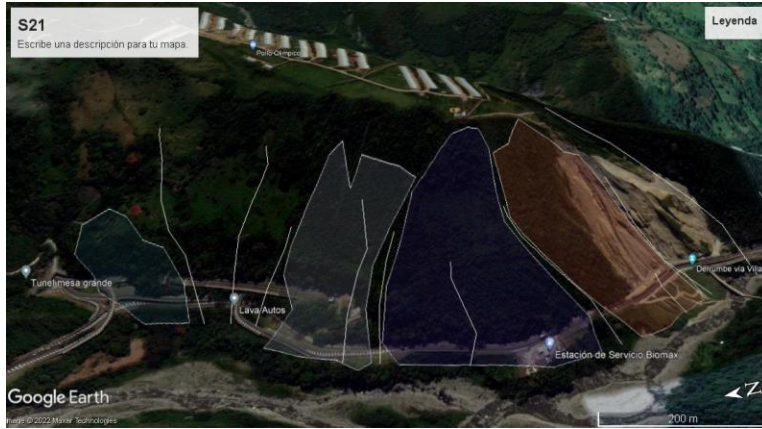


INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



5.9 Sitio 21, punto de calibración. ($4^{\circ}13'46.66''N$; $73^{\circ}48'43.94''O$)

ZONAS DE RIESGO - SITIO 21.



INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



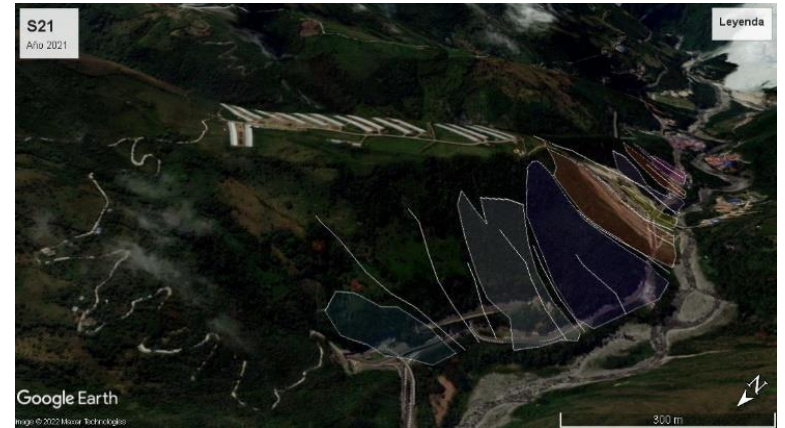
INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



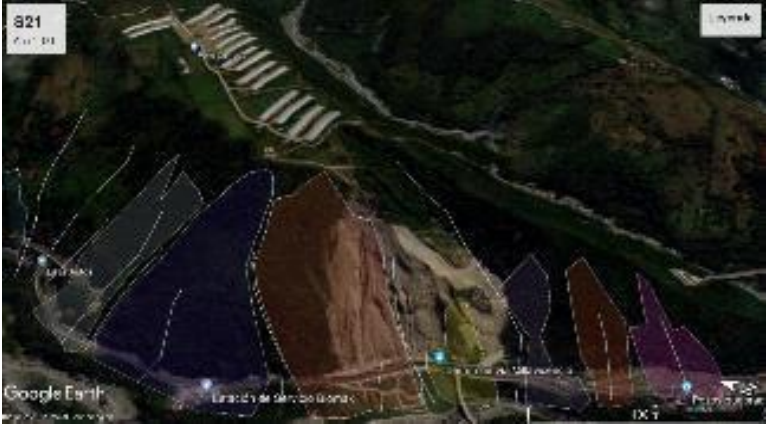
RELIEVE 2015 VS 2021



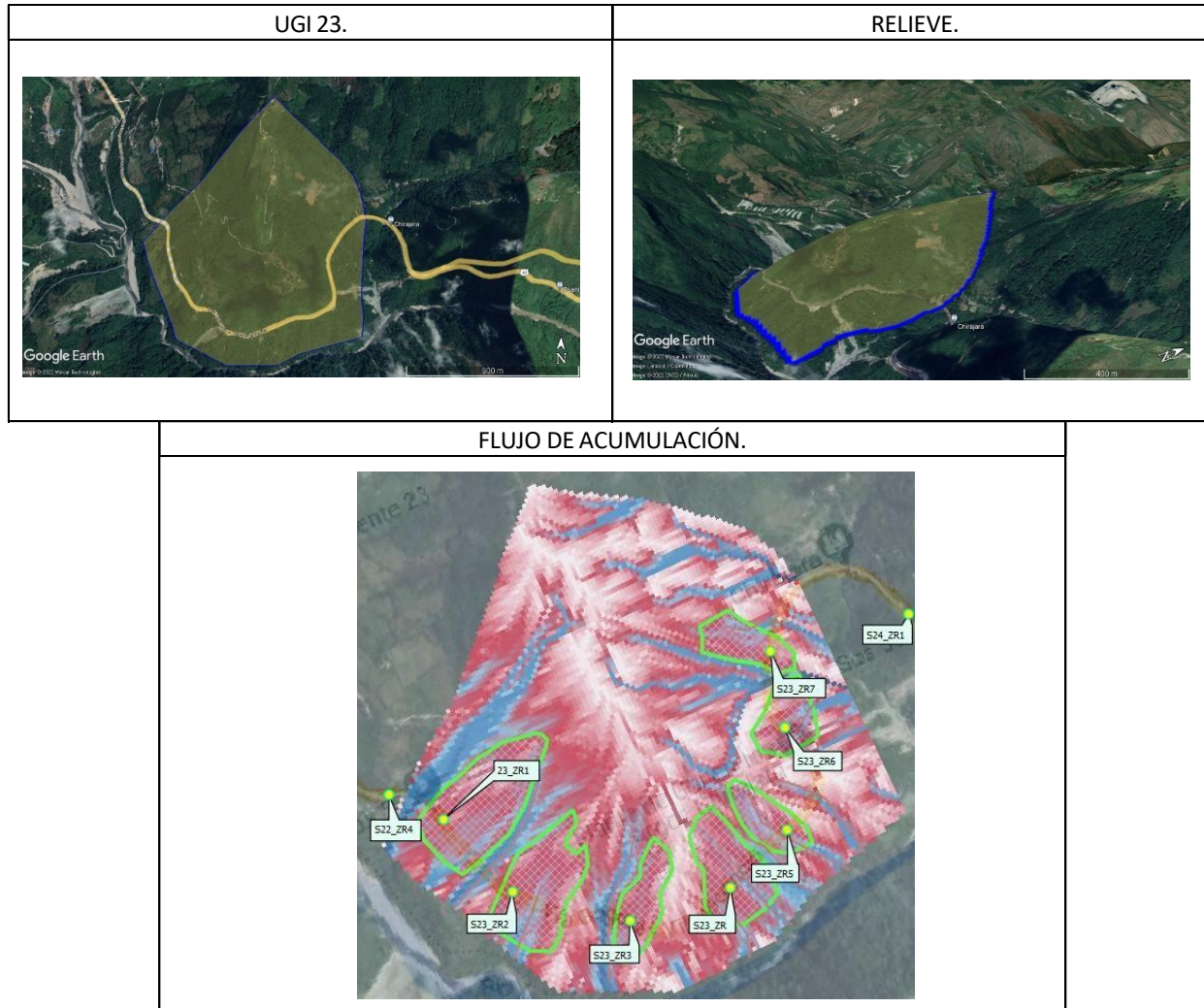
RELIEVE 2015 VS 2021



RELIEVE 2015 VS 2019 VS 2021



5.10 Sitio 23. (4°12'9.95"N; 73°48'7.77"O).



ZONAS DE RIESGO - SITIO 23.



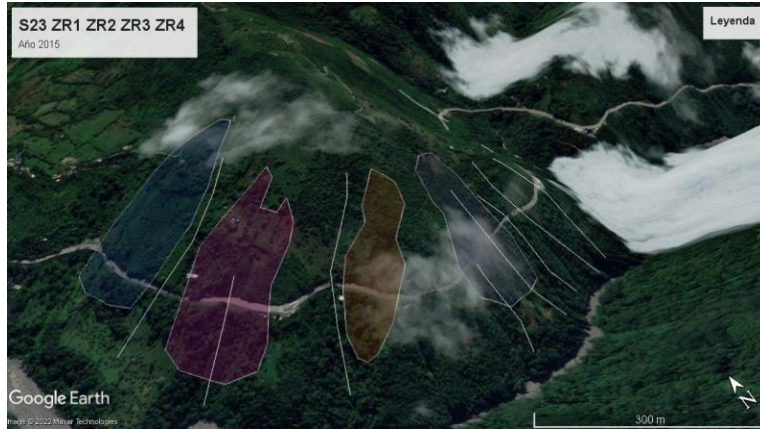
INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



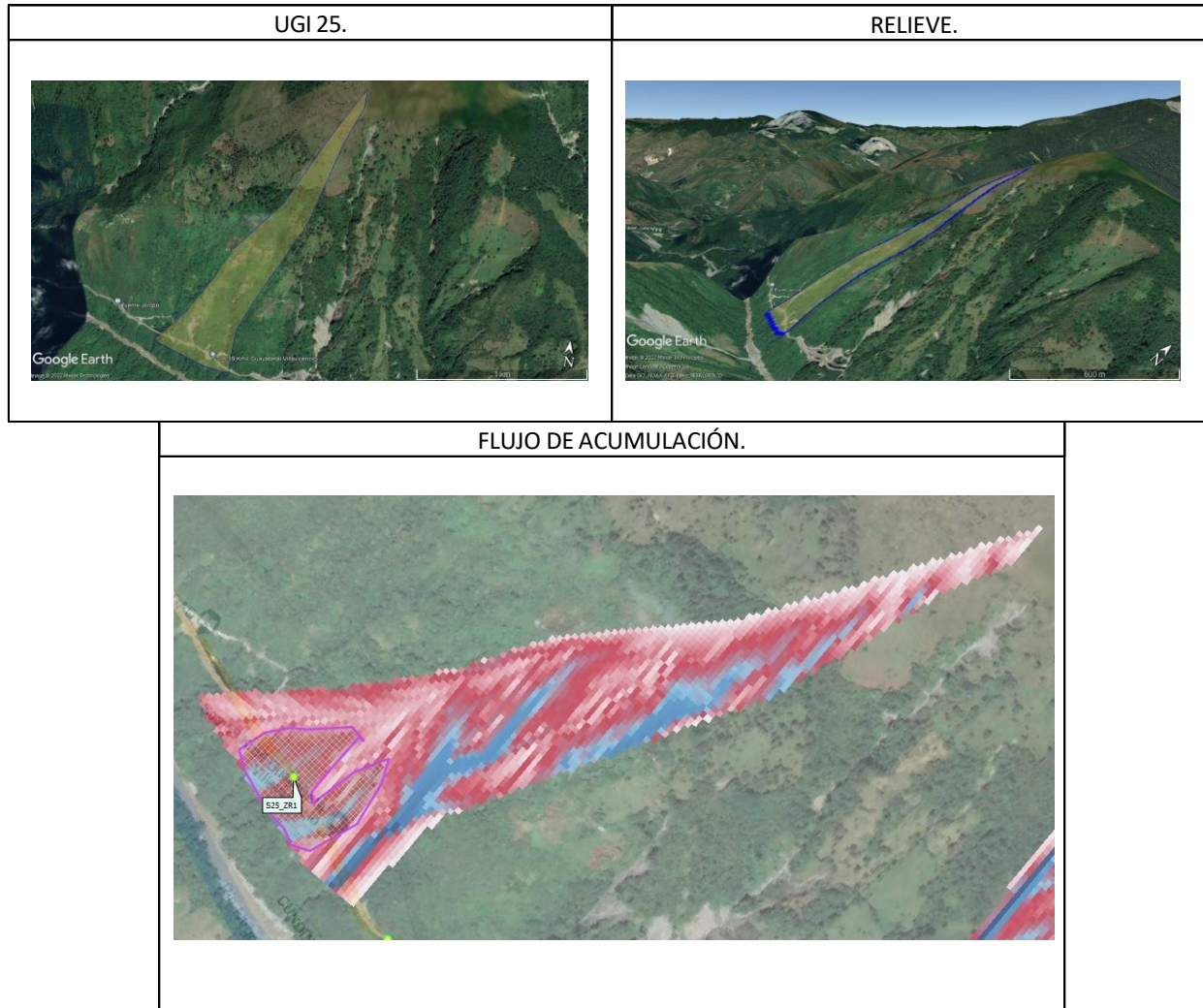
RELIEVE 2015 VS 2021



RELIEVE 2015 VS 2017



5.11 Sitio 25. ($4^{\circ}12'34.32''N$; $73^{\circ}46'43.19''O$).

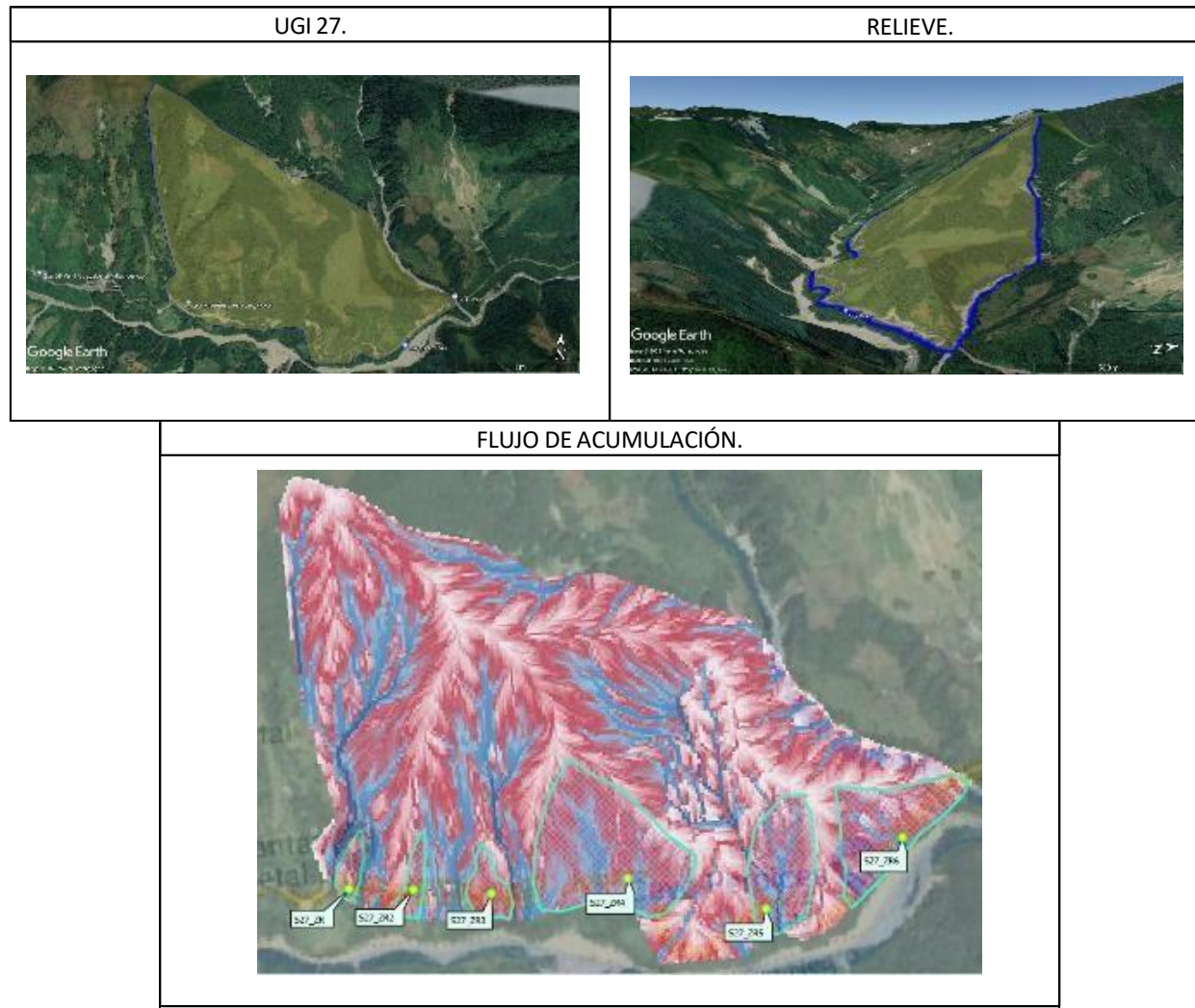


INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



RELIEVE 2015 VS 2021



5.12 Sitio 27. ($4^{\circ}12'25.13''\text{N}$; $73^{\circ}45'22.27''\text{O}$).

INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



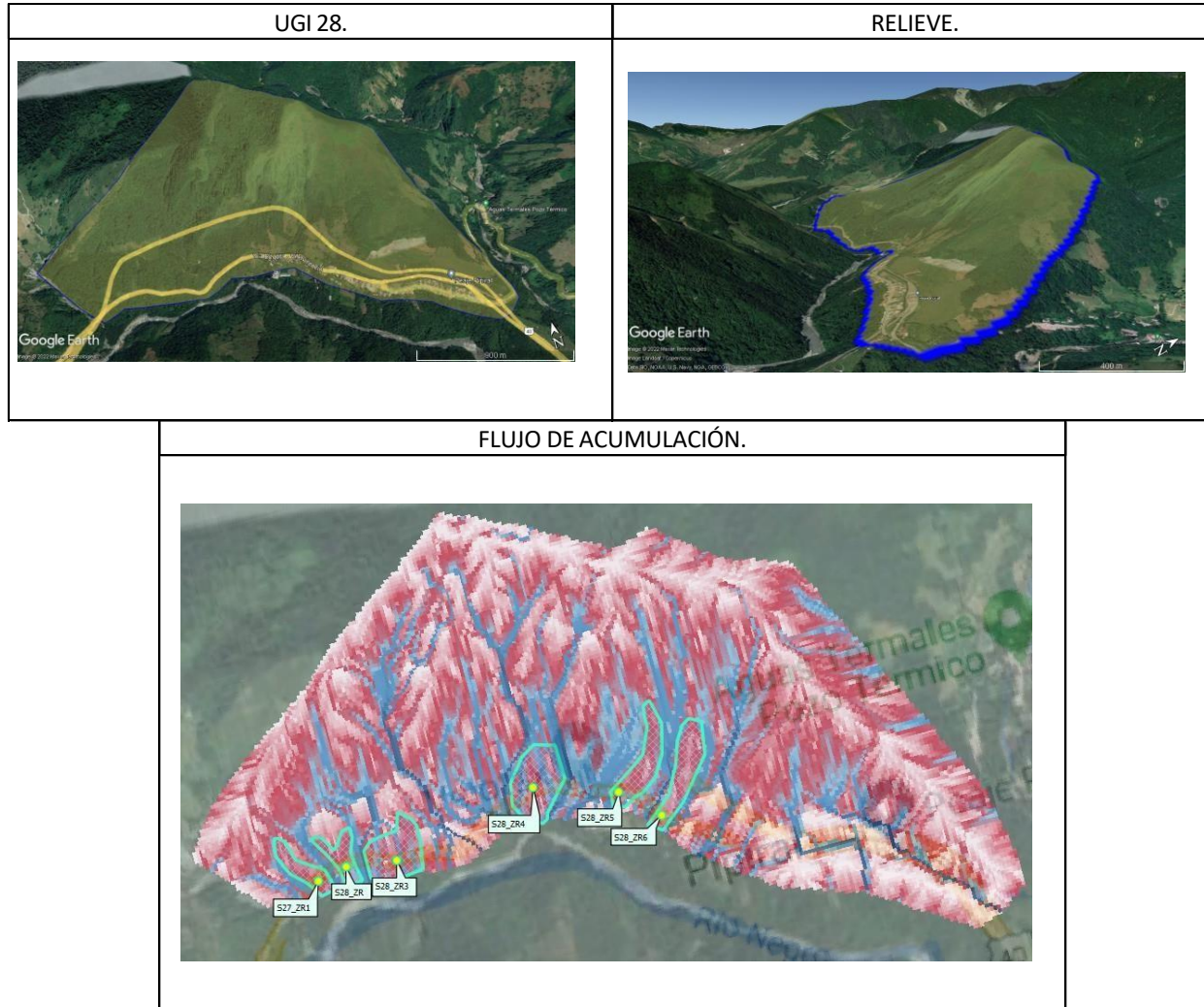
RELIEVE 2015 VS 2020



RELIEVE 2015 VS 2019



5.13 Sitio 28. (4°12'25.13"N; 73°45'22.27"O).



ZONAS DE RIESGO - SITIO 28.



INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



INSPECCIÓN DE LAS ZONAS DE RIESGO



6. Análisis de resultados y discusión.

Se obtuvieron para los 85.6 km (Coviandes, 2022) del corredor vial Bogotá – Villavicencio, 28 sitios con áreas de terreno con amenaza de deslizamiento analizados desde el modelo de procedimientos de determinación del flujo de acumulación y a su vez para cada uno de estos se poligonizaron las zonas de riesgo representadas por flujo de acumulación entre 1500 y 3000 (Tabla 6.1) que se contenían dentro de los sitios de la siguiente manera:

Número de sitios y zonas de riesgo.

SITIO	ZONAS DE RIESGO ENCONTRADAS
1	11
2	6
3	1
4	3
5	7
6	8
7	14
8	1
9	7
10	17
11	4
12	5
13	5
14	1
15	5
16	7
17	8

18	4
19	2
20	2
21	9
22	4
23	7
24	7
25	1
26	1
27	6
28	6
	159

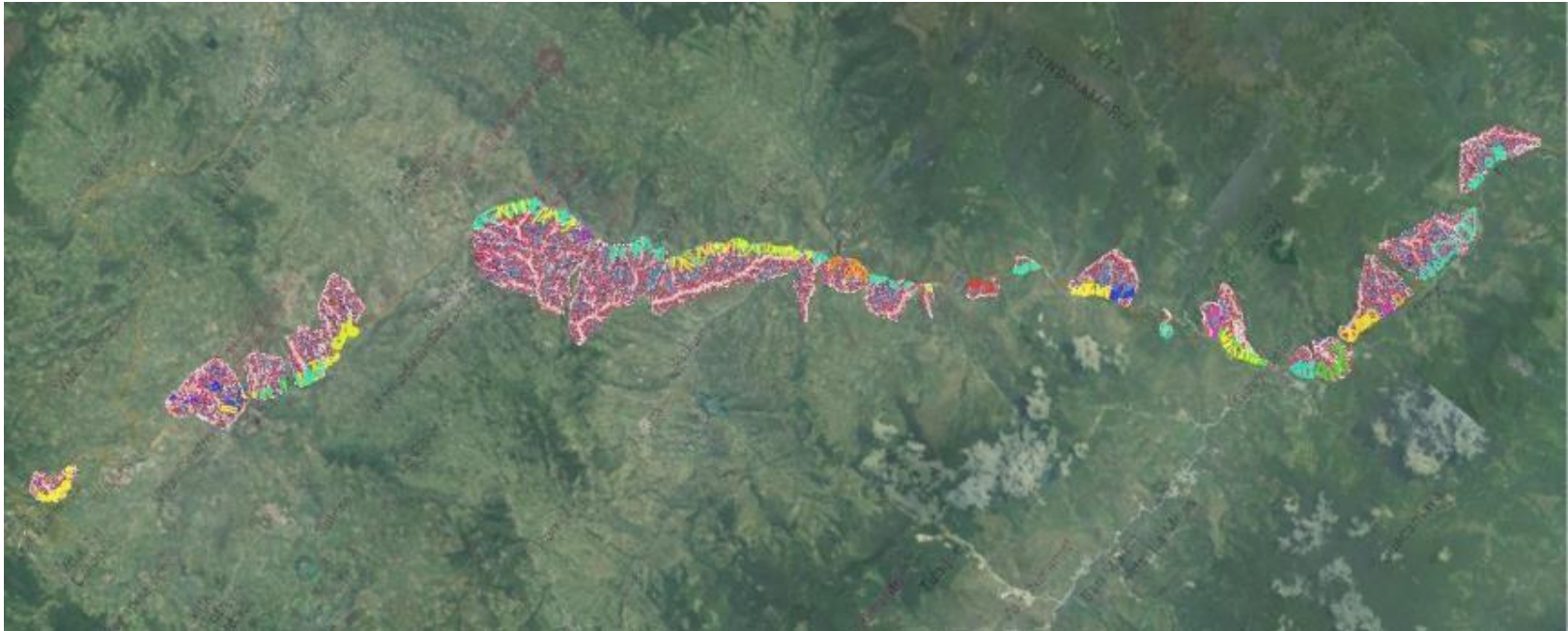
A partir de los resultados expuestos en el anterior apartado se hace el análisis visual y determinados los puntos con flujos de acumulación entre el rango de los 1500 a 3000, se obtienen 159 zonas con susceptibilidad de generar movimientos en masa.

Se evidencian 2 puntos con deslizamientos activos, uno de ellos el Sitio 21, del K58 y otro el Sitio 25, ubicado en el K64; el primero escogido para calibración, puesto que es un deslizamiento que contiene un gran volumen y área para visualizar el comportamiento del flujo de acumulación en toda el comprometida; y para el ultimo corroborando la presencia de flujo de acumulación precisamente en el área del deslizamiento y pixeles con valores mayores a 3000 donde ya actuó.

Los restantes 26 puntos poseen un flujo de acumulación que puede predecir algún evento erosivo de no cambiar o mejorar sus condiciones, estos como se explicara detenidamente en algunos; tienen condicionantes existentes como procesos geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos y litológicos que, sumado a factores desencadenantes generados por acciones antrópicas como la construcción de caminos reales sin manejo de agua, deforestación para

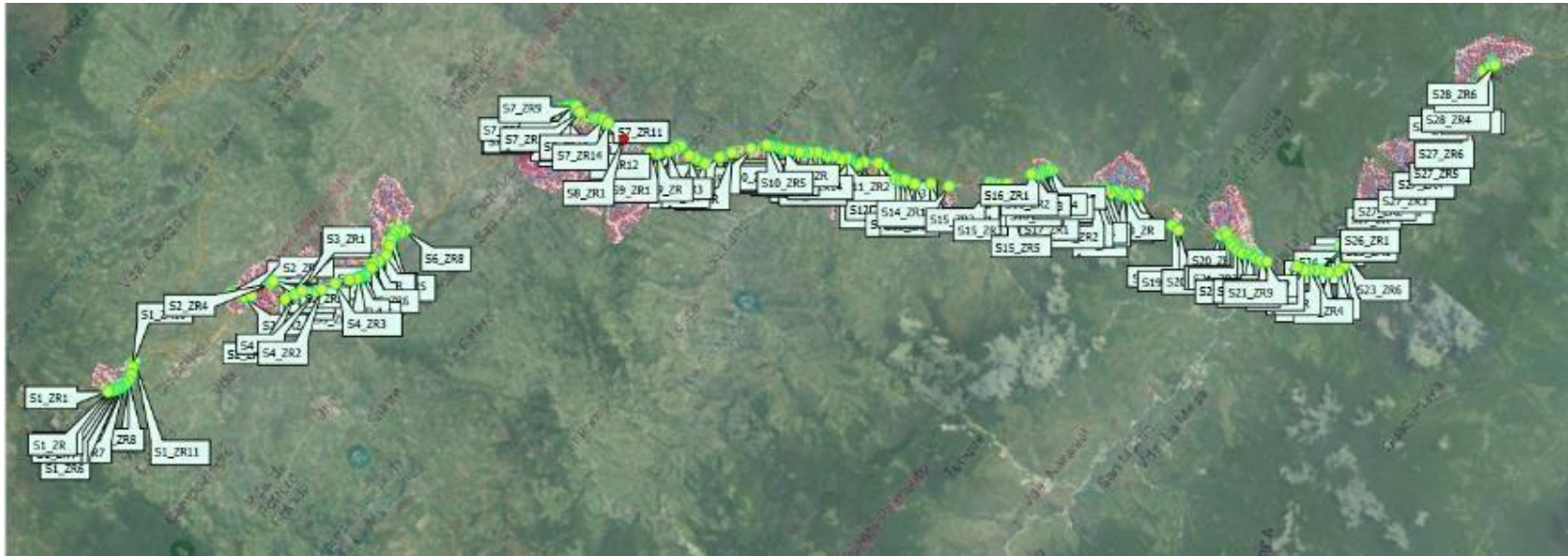
cultivos, pecuaria; ocasionarían desestabilización en algún momento. Se presenta a continuación el análisis de determinación del flujo y predicción fenómenos de remoción en masa por algunos sitios de importancia relevante.

Zonas con susceptibilidad de generar movimientos en masa.



Nota. Adaptado de QGIS 3.24.3.

Zonas con anotación de texto para identificar zonas con susceptibilidad de generar movimientos en masa.



Nota. Adaptado de QGIS 3.24.3.

6.1 Sitio 1.

El área correspondiente a este sitio cubre la vía en estudio, pero además involucra también la vía por la que se llegaba a la capital desde Villavicencio, antes de la construcción del túnel el Boquerón. A esta llegan vías terciarias o varios caminos reales que las personas han construido para la llegada de materias primas y comercio de cultivos y actividades pecuarias. Posee un terreno ligeramente ondulado, afectado por la deforestación y división del terreno en fincas o parcelas, no posee abundantes quebradas o riachuelos.

Al determinar el flujo de acumulación arroja como zonas de riesgo de deslizamiento y que intersecan con la vía de estudio 11 puntos y exportados en el Google Earth se evidencia que principalmente son generados por la presencia de múltiples lomos (zonas de riesgo 1-9) y explotación de la tierra (zonas de riesgo 10 y 11), además del aporte de flujo que hacen los caminos reales.

También en el Street view se encuentra zona 6, que ya tiene tratamiento en el talud, presenta un lanzado de una terraza y es identificado por la técnica del flujo de acumulación; así como también en la zona de riesgo 1 la técnica del flujo de acumulación con extracción de polilínea al Google Earth determina un río, cuyos píxeles superan el valor de 3000.

6.2 Sitio 4.

Afectado por vía superior que genera flujo de acumulación desde esta y hacia la carretera, también con flujo que parte de la media ladera, drenando hacia la vía principal. Tiene pendiente regular, este tramo posee obras ingenieriles que se han construido como corrección a deslizamientos, tiene taludes con lanzados primarios y tuberías como sistema drenante, gaviones con recubrimiento en concreto y disipadores para manejo de agua que descolan sobre las cunetas paralelas a la vía y a su vez en alcantarillas transversales que atraviesan debajo de esta.

La vía superior o camino real es un carreteable sin superficie de rodadura tratado, de alta pendiente, extenso, de sección transversal angosta y no cuenta con manejo de aguas. En la parte más alta y delimitando la UGI existe otro carreteable con características similares, un poco más angosto y con curvas pronunciadas en la que se puede almacenar y aportar mayor cantidad de agua de escorrentía a la ladera y propiciar las condiciones para que se presenten procesos de erosión y por consiguiente movimientos en masa. El relieve hacia proximidades a interceptar con la vía se va haciendo aparentemente más plano, criterio que minimiza la susceptibilidad a sufrir movimientos en masa.

Existen varios senderos que conducen de estas vías terciarias hacia fincas, mucho más pequeñas e igualmente sin obras hidráulicas, reflejadas en QGIS como una red de canales con flujos de acumulación con valores superiores a 3000. En el flujo de acumulación determinado se evidencia como los caminos reales son aportadores de flujo sobre la UGI, pues desde la parte media de esta se observa en generar más sitios en los que existe propensión a sufrir movimientos en masa, así como también se ve que se generan más ramales con cuerpos de agua que drenan sin control con dirección hacia la vía de estudio.

6.3 Sitio 5.

Contiene esta UGI la parte final del lomo de una montaña que ha sido explotada para la extracción de materiales pétreos con un área de 97807 m², atravesada en la parte superior por la misma vía del sitio 2, que conduce de Ubaque a Abasticos y que a su vez llega a Bogotá por el sector de la Calera. Este carreteable (Código Nacional de Tránsito, 2002) tiene la curva más pronunciada en este tramo generando a partir de allí el flujo de acumulación con más altos valores. La técnica cuantifica la cantidad de flujo que se acumula en determinada área sin determinar la composición del terreno, pero como se ha expuesto, el presente trabajo corresponde a un trabajo pre exploratorio que determina la propensión a generarse movimientos

en masa en referencia a esto, pero una vez identificadas las zonas con propensión se deben aplicar los criterios geo mecánicos y estructurales del suelo para terminar de determinar la susceptibilidad a que se generen movimientos en masa.

Es una zona en la que predomina el manto rocoso y evidencia la técnica del flujo de acumulación valores superiores a los 3000 pixeles, que ser exportados del QGIS al Google Earth como se muestra en el apartado 5.3, que no representa obras hidráulicas ni cuerpos de agua natural, la única zona que se encuentra con tratamiento es la zona de riesgo 7 al finalizar esta UGI. Desde el año 2000 se empieza a mostrar la explotación de material, pero apenas cubría un área de 12578 m².

6.4 Sitio 6.

Contiene dos vías veredales ubicadas casi perpendicularmente a la carretera en estudio, caracterizadas por múltiples curvas, sin superficie de rodadura tratada, ni obras hidráulicas, particularidad de las vías en este sector. Una de las vías, la vista en la derecha, fue localizada en un valle y para el flujo de acumulación en este sector evidencia pixeles hasta de 516235 sin observarse puentes que indiquen paso de afluentes, la vía vista en el costado izquierdo de este sitio se localiza en la parte superior, en el lomo lo que también genera acumulación de agua de escorrentía con la tendencia a drenar hacia el valle. Estos caminos podrían iniciar procesos de inestabilidad puesto que en descrito inicialmente podría debilitar la pata del talud y en el segundo generar erosión lateral, escarpes o terracetas. Como los sitios localizados hacia abscisas menores de la vía Bogotá - Villavicencio estos tienen generalmente uso agropecuario y pecuario, por lo que el suelo está conformado solamente por cultivos o pastizales.

Uno de los sectores cuenta con un sistema de protección y contención, como el lanzado que posee grietas que han sido reparadas y gaviones recubiertos con concreto en el que se ve la actividad persistente del movimiento de masa de suelo, también las líneas de flujo de acumulación con pixeles mayores a 3000 extraídas del QGIS y vistas en Google Earth

corroborando que no corresponden a elementos hidráulicos. En la actualidad se presentan de los fenómenos de erosión en surcos que por su comportamiento en general tienden a transformasen en zanjas a lo largo de la pendiente del terreno.

6.5 Sitio 9.

Localizado en la cadena montañosa frente a la que se encontraban las UGI anteriores, pero también este sitio presenta características similares; este sitio está afectado por dos vías rurales en la parte superior, de las que subdividen caminos veredales de menor sección y longitud, son paralelas a la vía en estudio. La que se encuentra más a la corona del talud es la que conduce de Fosca a Cáqueza y la segunda es la vía antigua de Villavicencio a Bogotá entrando por el municipio de Cáqueza-Cundinamarca. Tiene poca cobertura vegetal y más alta pendiente. Las vías terciarias que se encuentran en esta zona si tienen cunetas y disipadores en ambos costados de vía, su capa de rodadura está en asfaltada, pero presenta fisuras, muestra del desplazamiento del material de fundación, a lo largo de esta se presentan caída de fragmentos de roca, se presentan 7 zonas de riesgo que interceptan con la vía de estudio, el flujo de acumulación evidencia los múltiples cuerpos de agua por la que es atravesada y las áreas con alta propensión de deslizamiento están intermedias a estos. Mediante el flujo de acumulación se evidencia la afectación que tienen las vías terciarias o caminos reales y que no están controladas o no tienen un apropiado manejo del drenaje, estas aportan los flujos sin dirección a través de las UGI generando posibilidades de generar movimientos en masa.

6.6 Sitio 12.

Llega a la carretera en estudio una vía terciaria hecha en losas de concreto o placa huellas, localizada perpendicularmente al sentido de la vía, esta conduce a una finca avícola que

está a media ladera, en la parte alta existe una granja y viviendas a su alrededor. Este sector tiene alta pendiente, y el relieve es más boscoso y empiezan a surgir más corrientes de agua, por lo que el material y clima también empieza a variar. Terreno menos rocoso y aumenta la temperatura ambiente. A esta conecta una galería de escape de un túnel denominado 3ª, el sector presenta movimiento del terreno, el asfalto se encuentra fisurado en algunos tramos y unas viviendas también tiene grietas y otras ya se han perdido ladera abajo 5 zonas que intersecan con la vía presentan flujo de acumulación entre 1500 y 3000.

6.7 Sitio 15.

Esta zona se encuentra en medio de dos lomos y presenta cárcavas, una de estas como cicatriz puesto que no está activa y ha sido revegetalizada naturalmente, aun así, por su topografía y acumulación de agua se evidencia como acumulación de flujo con pixeles mayores a 3000. Este es uno de los sitios en los que se debería presentar alerta. Se hace un análisis temporal, ya que es de gran importancia ver que las condiciones del terreno del año 2003 ya son tomada por el flujo de acumulación (cuyo DEM data del año 2009) exponiendo las zonas con alta propensión de sufrir movimientos en masa; en el flujo de acumulación se observa que a partir de la línea de inicio de la cárcava es donde se empiezan a generar mayores valores para el flujo de acumulación, condición que empeora para el año 2020, pues para ese año se le suma otras acciones que propician un deslizamiento, como lo son la construcción de viviendas que traen consigo la construcción de caminos reales, generando mayores aportes de flujo sin control al área, muestra de ello es la pérdida de vegetación y presencia ya de deslizamientos menores.

También comprende 1 camino en zigzag perpendicular a la vía de estudio y otro paralelo en la parte alta de la UGI. Este último en su trayecto presenta valores de flujo menores a 1500 y a partir de este discurre hacia la pata del talud un flujo que permite poligonizar las 5 zonas de riesgo que se representan para este sitio. Su pendiente aparentemente es homogénea. Tiene

dos sectores con agrupación de viviendas en zona de riesgo (ZR1 YZR3) de acuerdo al flujo de acumulación determinado.

Mediante un análisis cronológico se observan los cambios que se tienen entre los años 2003 y 2020, pues no se encontraba poblada esta área y en la actualidad existen dos agrupaciones de viviendas. Al llevar los polígonos que tienen posibilidad de colapso al Earth y analizar su vista en Street View a orilla de la vía se ve que el tipo de material no está en las condiciones más estables para la construcción de comunidades, las personas han colocado llantas apiladas con la finalidad de confinar dicho material, pero estos esfuerzos sin determinar su causa son en vano.

La zona de riesgo 4 abarcada dentro de este sitio de estudio ha sido por años un punto crítico de la vía Bogotá – Villavicencio, desde el 2003 cuando duro 3 días la vía cerrada por el desbordamiento de las quebradas, la Quiña y Estaquecá, que nacen en la parte alta del talud de esta zona se iniciaron estudios y soluciones constructivas; el periódico El Tiempo (2003) en su página público el reporte de la causa que generaría dicho deslizamiento.

Reportes entregados por el INVIAS señalaron que en la pasada emergencia del 25 de julio el aumento del caudal de la quebrada se ocasionó por el desprendimiento de tierra de la parte alta de la montaña, donde nace el afluente, que hizo que bajara una avalancha de lodo y piedras sobre la vía.

Para el año 2011, en el mes de noviembre se inició la construcción de 2 falsos túneles de 60 m y 100 m cada uno, con el fin de proteger el tráfico vehicular de los derrumbes que frecuentemente caen a la vía, solución que consistió según lo menciona FOSTER en:

Una losa inclinada de un espesor de 1,1m, por medio de vigas temporales en super stud de 8,7m de longitud cada 60cm hasta completar 84m de cama de trabajo. Ésta descansa sobre torres de carga en sistema shoring a 6,8m y 5m de altura, dejando una luz libre de 5,5m.

Y aun a la fecha sigue causando inconvenientes, para el año 2021, reportó El Espectador (2021):

Las precipitaciones, que generaron deslizamientos de tierra, también ocasionaron el desbordamiento de la quebrada Estaquecá. Hacia las 2:00 a.m. la concesionaria anunció el cierre total de la vía ya que las condiciones meteorológicas impedían que se desarrollarán las labores de limpieza.

Este cierre duro varios meses, afectando el comercio de la zona y además el tránsito vehicular normal; pues este sector ya se encontraba construido para funcionar como doble calzada; pero al quedar totalmente deshabilitado mientras se hacían obras de mitigación en la pata del talud de la vía para que no hubiese pérdida de la banca, se debió dar paso bidireccional por el Túnel llamado Renacer que ya funcionaba con dos calzadas en un solo sentido (Villavicencio – Bogotá).

6.8 Sitio 19.

En este sitio la técnica del flujo de acumulación permite identificar 2 zonas de riesgo, se delimita y se tiene en cuenta puesto que posee un lomo de gran importancia y que a su vez desprende otro que cubre este sitio a analizar. Tiene una gran pendiente y la vía en estudio posee una curva pronunciada de la que se desencadena el flujo de acumulación entre 1500 y 300 talud abajo, asimismo un camino real en la parte superior, paralelo y muy junto a la vía que conduce a unas pocas viviendas en el que puede estar actuando fenómeno de agua sin cabrilla. Metros más adelante de esta UGI se encuentra el lugar donde se presenció en junio de 1974, la tragedia de Quebrada Blanca, que se desato luego del descubrimiento de una gran grieta, que sumado al invierno y condiciones topográficas de la cordillera Oriental genero un derrumbe de grandes proporciones. La inspección visual se hizo días atrás y los ingenieros del entonces distrito 13 de Carreteras, ayudados por el Ejército Nacional, trataron infructuosamente de generar un derrumbe controlado, y llevaban 7 días de cierre cuando ocurrió la tragedia que dejó como

saldo más de 500 personas desaparecidas (García, 2019). Estos hechos reafirman la necesidad de predecir en este y en los demás puntos, deslizamientos con la finalidad de evitar pérdidas humanas y económicas.

Estas zonas de riesgo involucran el túnel construido posterior a la tragedia (Túnel Quebrada Blanca) que actualmente se encuentra en sentido Bogotá – Villavicencio, así como también los túneles localizados en la parte más inferior de este en sentido Villavicencio – Bogotá.

Figura 6.8.1. *Derrumbe sector Quebradablanca, año 1974.*



Nota. Tomada de *El cuarto Mosquetero*.

6.9 Sitio 21.

Área que como se ha venido mencionando pertenece a un talud ya fallado y corresponde al sitio que ha generado mayor en la intervención de la vía últimamente, contiene una gran área de deslizamiento y que por este motivo se determinó como punto de calibración para los rangos

y gama de colores que representan los pixeles arrojados posteriormente a la aplicación de la técnica del flujo de acumulación.

Su relieve esta predominado en la parte de la corona por un relieve empinado, posteriormente descansa en una meseta en la que se instauró una industria avícola aproximadamente desde el año 2007; según el informe de asistencia técnica de la gobernación de Cundinamarca (Mora, A. 2018); y termina en un talud empinado nuevamente Tienen como vía de acceso un camino real con varias curvas, de alta pendiente que delimitado en la UGI 20 y que presenta pixeles mayores a los 3000, sin que en este se evidencie cuerpos de agua. y cuyo DEM de fecha del año 2009,

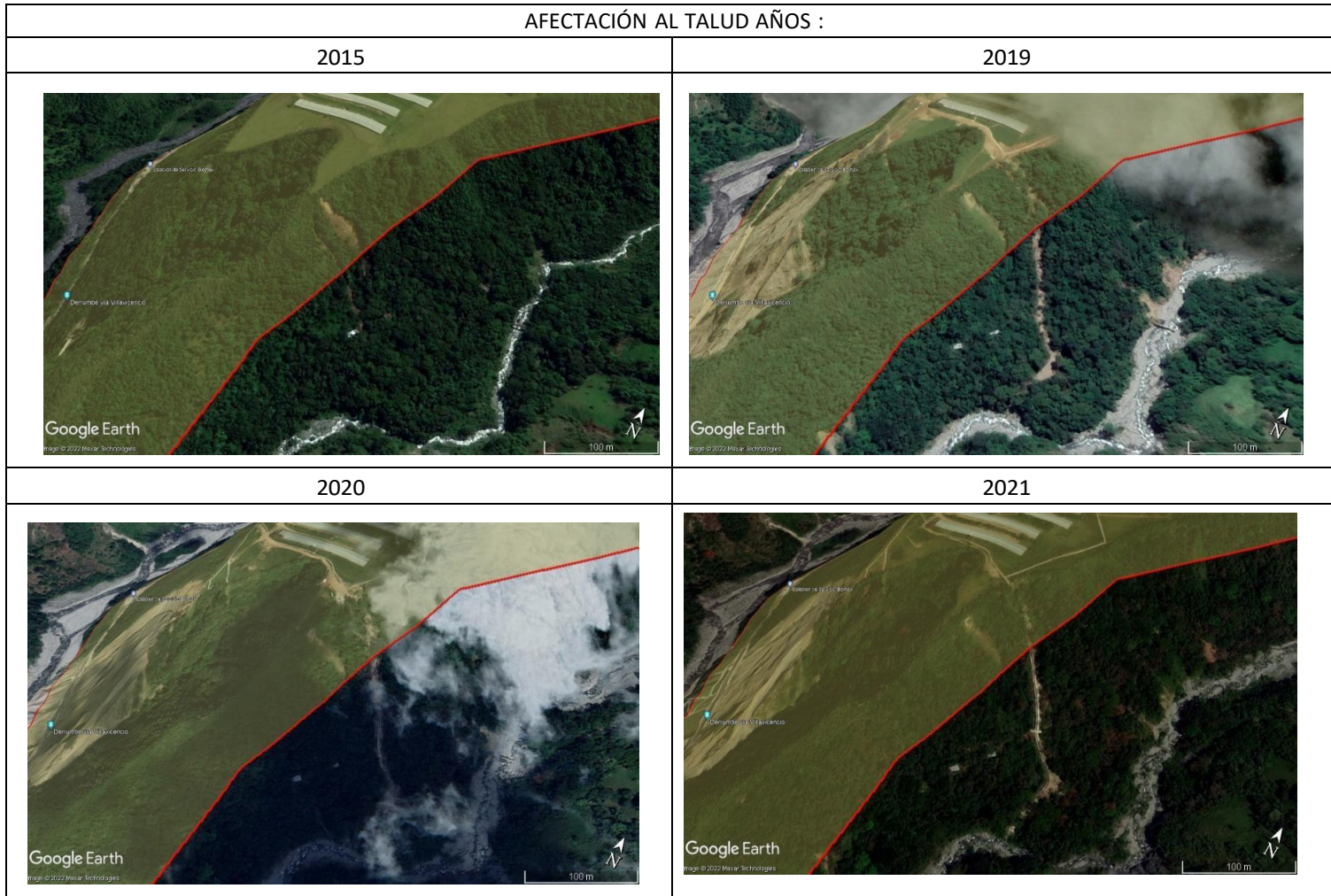
Es el punto inicial de una cadena de túneles que conectaran al puente Chirajara y que por consiguiente también se ha visto afectado por las detonaciones controladas que se llevaron a cabo para la construcción de estos.

Se encuentra en la montaña en frente de la que se presentó la tragedia del Quebrada Blanca (sitio 19), cadena montañosa que posee múltiples vertientes y que por todo lo anterior y sumado a la fuerte temporada invernal dio paso a grandes movimientos de tierra.

Corren por lado y lado de esta montaña dos grandes afluentes, río negro y la Quebrada Perdices. Por el costado lateral, donde está la quebrada y como se muestra en la Figura 6.9.1, desde el año 2015 se inició el deslizamiento con pendiente dirigida hacia la quebrada; así como también se expone en el apartado 5.9, por la cara anterior del talud para el año 2015

aun había vegetación boscosa, es decir no se había generado ningún tipo de desplazamiento, ya para los años 2019 y 2021 se desencadenó el derrumbe.

Figura 6.9.1. Comparativo afectación talud año 2015 y 2019.



En el año 2019, se presenta deslizamiento de material por el lugar que discurre el agua sin control, dejando huella y llegando a la pata del talud, esto mismo se evidencia por la cara principal del deslizamiento.

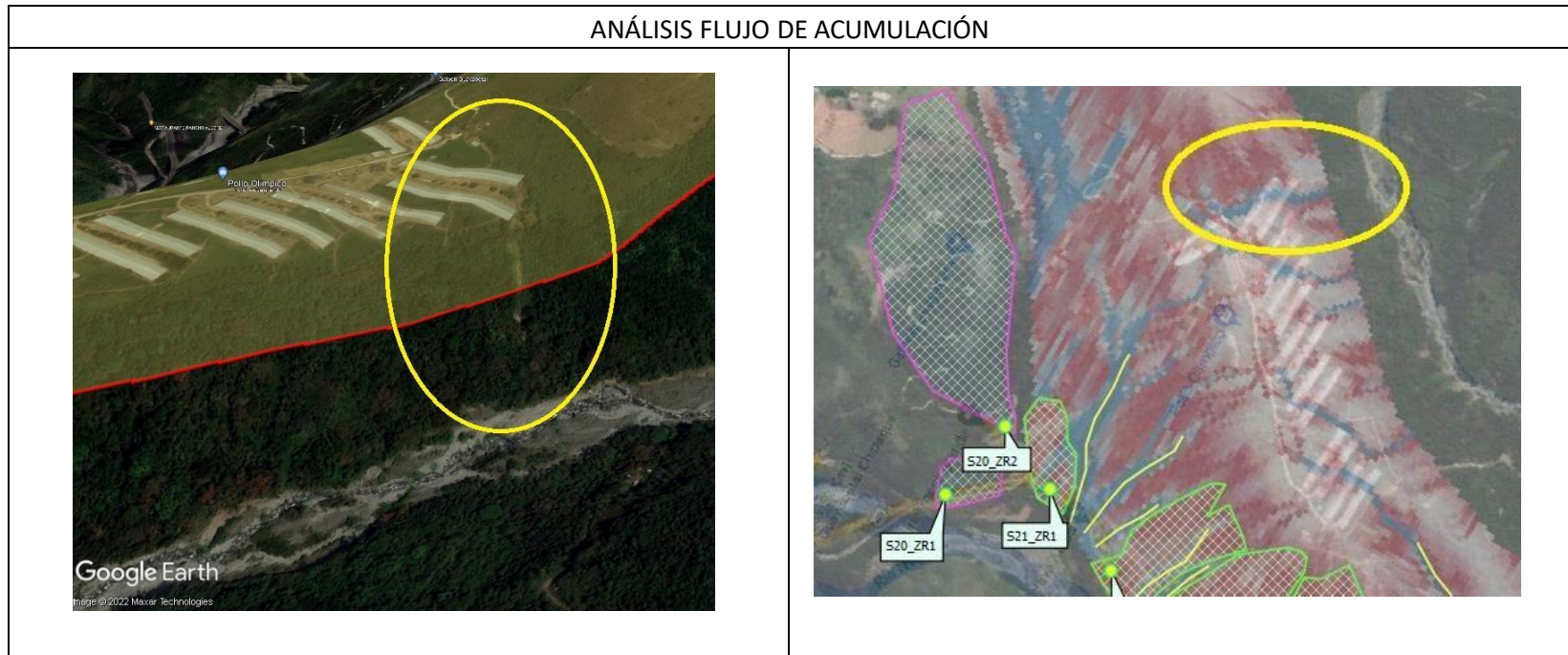
Para el año 2020 se inicia una obra hidráulica en este lugar, pero en la cara frontal el movimiento en masa ya se había generado. En el 2021 se ve culminada dicha obra hidráulica, conectando el agua de las vías internas de la granja hasta descolar en la quebrada y en la parte frontal ya no había manera de detener el proceso, simplemente se esperó que el talud se descargara, con ayuda de fuertes precipitaciones, por sí mismo.

Desde la técnica del flujo de acumulación también se analiza que, en la parte posterior, al inicio de la meseta se acumulan más de 3000 pixeles sin evidenciar riachuelos allí, al ir al Google Earth se identifica en este punto pérdida de vegetación e inicio de movimiento en masa como el comentado anteriormente y aunque no interviene directamente la vía, puede el material desplazado represar la quebrada y generar avalancha. Figura 6.9.2

En la inspección de sitio, se observa que el material desplazado está compuesto por rocas hasta de 1.5 m y para ser retiradas de la vía se han tenido que fragmentar con material explosivo. La dureza de estas también ha generado tardanzas en su perforación, así como mayor empleo de brocas para su perforación.

Por otra parte, la obra que se realizó para minimizar la afectación en la vía fue la construcción de un muro metálico con hileras de llantas por detrás de este para reducir la velocidad de impacto con que las rocas caen y a su vez contener material.

Figura 6.9.2. Socavación parte lateral del talud.



6.10 Sitio 23.

Comprende un camino real en la parte superior del lomo, pertenece a una zona con múltiples vertientes y abarca el estribo Bogotá del puente Chirajara. Se determinaron 7 zonas para su análisis, pertenecen los pixeles de menor valor a la zona predominada por el lomo, las líneas de flujo de acumulación con pixeles mayores a 3000 se ubican en la pata el talud, son más anchas que en las zonas estudiadas anteriormente.

En la vista del Google Earth se marcaron las líneas de flujo y se nota que unas pertenecen a cuerpos de agua o también a obras hidráulicas, o también representan las zonas de alto riesgo o talud con deslizamiento activo como en la zona de riesgo 2. Este sector cuenta con obras de contención como gaviones recubiertos con concreto, mallas de contención pernadas para talud, que indican la inestabilidad presente en el lugar debido a fenómenos de volcamiento del material. Además del flujo de acumulación que se genera a partir del camino real, también es de notar el cambio de la vegetación entre los años 2015 y 2021 en los costados de la vía en estudio y de la posible socavación que ha generado el río en la pata del talud generando zonas de riesgo con mayor agrupación de pixeles entre los 1500 y 3000 o superiores.

6.11 Sitio 25.

Comprende un área pequeña, delimitada de este modo ya que está ubicada en medio de las quebradas Caridad y Aserrío en el K64 de la vía Bogotá-Villavicencio, este punto ya se encuentra afectado por un deslizamiento que hasta el 2020 había venido presentado el avance de procesos erosivos activos y la generación de nuevos deslizamientos, clasificados como caída-desprendimiento. En la corona de esta UGI se ve la agrupación de viviendas y por consiguiente la deforestación para aprovechamiento del suelo, en este caso, para pastoreo, dejando el terreno desprotegido y que con la acción de los cambios meteorológicos se presta para crear un

ambiente propicio para los movimientos en masa, pues en evidencia ello está el comportamiento anómalo del clima para los años 2018 – 2020:

El día 26 de agosto de 2018 se registran precipitaciones TORRENCIALES en el sector de Chirajará con 175.2mm, indicando que, para un análisis multitemporal, ese día se presentó la mayor precipitación registrada en el sector de tercio medio y tercio final en los últimos siete años. (Valencia, 2020).

Esto generando casi erosión total a lo largo de la UGI, pues estos sectores están conformados por microcuencas que al presentarse fuertes lluvias saturan el material de la ladera poco consolidado y de alta pendiente. El flujo de acumulación de la zona contiene pixeles generalmente superiores a los 1500, pues el material ha cambiado su condición, convirtiéndose en material depositacional a partir de caída y arrastre a media ladera como un depósito coluvial colgado sobre rocas metamórficas, creando un bloque desconfinado en el tope.

En el 2015 se encuentra como zona protectora el bosque primario y ya para el año 2021 predomina zonas de pastoreo y resto de las obras de mitigación que fueron implementadas en el 2019 como se expone en el apartado 5.11.

Si estos sucesos se analizan desde la modelación del flujo de acumulación y se puede dar tratamiento preventivo sin dar paso a su progresividad remontante.

Las siguientes figuras exponen lo sucedido con el deslizamiento progresivamente.

Figura 6.11.1. Inicio del deslizamiento en el PR64+200, 14 de julio de 2018.



Nota. Caída-desprendimiento del material del coluvión colgado con presencia de bloques métricos en una matriz limo-arenosa. Tomado de *Informe de seguimiento condiciones de los procesos erosivos en el PR64+200 y PR64+350*, por J.P. Valencia, 2020.

Figura 6.11.2. Obras de estabilización de la ladera, 15 de mayo de 2019.



Nota. Control del proceso erosivo y manejo de aguas superficiales, mediante la conformación de terrazas, zanjas de coronación y cajas de conducción. El aumento en la pluviosidad, para la época invernal de 2019, generó la socavación en la base de las

terrazas con posterior colapso, los materiales no consolidados, sin cohesión y saturados continuaron con su desprendimiento, poniéndose en riesgo el personal y los equipos. Tomado de *Informe de seguimiento condiciones de los procesos erosivos en el PR64+200 y PR64+350*, por J.P. Valencia, 2020.

Figura 6.11.3. El proceso se alinea con el trazo de una microcuenca que llega hasta el parteaguas que limita el proceso erosivo del PR64+000. 09 de julio de 2019.



— Trazo línea de flujo en microcuenca

Nota. Tomado de *Informe de seguimiento condiciones de los procesos erosivos en el PR64+200 y PR64+350*, por J.P. Valencia, 2020.

Figura 6.11.4. Desprendimiento del PR64+200. Junio de 2020.



Nota. Muestra que ha avanzado considerablemente, destruyendo el 70% de las terrazas de contención, en el cuerpo del deslizamiento es conformado por grandes bloques de filita suspendidos. Tomado de *Informe de seguimiento condiciones de los procesos erosivos en el PR64+200 y PR64+350*, por J.P. Valencia, 2020.

6.12 Sitio 27.

Se tomó gran extensión para delimitar esta UGI, puesto que se abarco toda la terminación de una ladera; tiene como límite al oeste la Quebrada Susumuco, la cual surge en la cabecera de esta montaña y en poco trayecto esta zona con su gran riqueza hídrica forma una caudalosa Quebrada, que por estar en un tramo corto y de lata pendiente genera procesos erosivos. Tiene presencia de pocos asentamientos poblacionales, solo unos contiguos a la vía. Mediante el flujo de acumulación se puede evidenciar que en el relieve del 2015 vs 2019, presenta las zonas de riesgo determinadas con el DEM de fecha 2009, con deslizamientos de algún tipo en el año 2019.

Este punto pertenece a la misma montaña que el sitio expuesto anteriormente, por ende, la susceptibilidad a sufrir movimientos en masa son las mismas, así como las características geomecánicas del suelo también lo son.

En la parte inferior de la vía se hizo la construcción de un viaducto de 962 metros que lo convierte en el más largo del proyecto del tercio medio de la doble calzada, para su construcción se debieron hacer accesos de vías industriales, así como el uso de material explosivos para la excavación de los pilotes, pudiendo afectar su estabilidad. Para el 2015 se ve buena cobertura vegetal que ya no está presente, únicamente en la zona de riesgo 5 se ve un proceso de revegetalización en una cárcava que estaba en formación para el año 2015 y en el año 2019 se observa con cobertura vegetal. Gran parte del talud adyacente a la vía se encuentra con malla de protección pernada.

6.13 Sitio 28.

Unidad Geomecánica de Independiente delimitada en medio de la quebrada Susumuco y Pipiral. Área adyacente a la vía tomada desde el eje del lomo hacia la base del talud, pendiente regular, contiene 6 zonas de riesgo sobre la vía del inicio y hasta la mitad del polígono, de ahí hasta el fin de la UGI no se ve flujo de acumulación crítico se tienen pixeles menores a 1500 posiblemente por ser un área de pendiente menor y tener tratamiento en estos taludes.

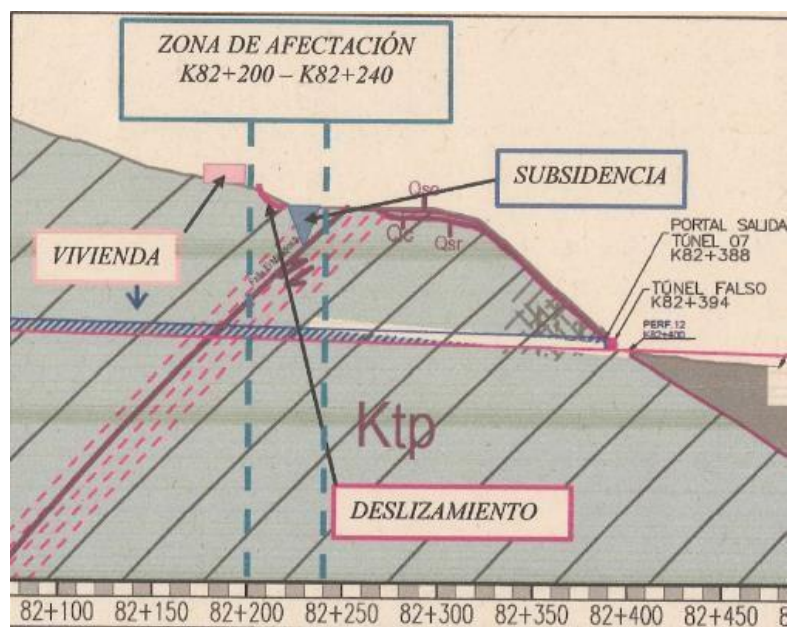
Se observa múltiples corrientes de agua naturales y redes de canales como manejo de agua. Es el ultimo sitio analizado puesto que los taludes en adelante no de alturas considerables y llegando a la ciudad de Villavicencio una montaña es atravesada por túneles, pero que para el año 2018 si llego a ver afectada su estabilidad por un fenómeno de subsidencia sobre este túnel llamado Buenavista entre los K82+200 y K82+240, en una visita a obra se verifico las condiciones del talud cuya altura era de 31 m aproximadamente y posiblemente fue generada por deforestación para la construcción de vivienda de 2 niveles y además de las detonaciones para la excavación del túnel.

Figura 6.13.1. Zona de afectación en perfil geológico Túnel Buenavista.



Nota. Tomado de Asesoría técnica para la construcción de las obras correspondientes a la nueva calzada entre Chirajara y la nueva intersección fundadores, del corredor Bogotá Villavicencio, por R.E. Mora, 2018.

Figura 6.13.2. Localización de la zona de afectación en perfil geológico Túnel Buenavista.



Nota. Tomado de *Asesoría técnica para la construcción de las obras correspondientes a la nueva calzada entre Chirajara y la nueva intersección fundadores, del corredor Bogotá Villavicencio*, por R.E. Mora, 2018.

Así como se puede determinar el comportamiento de los sitios descritos anteriormente se puede hacer el análisis a los taludes adyacentes a la vía Bogotá – Villavicencio bajo la misma metodología, por ser un método pre exploratorio aún no se tiene en cuenta en la formación de este documento la toma de laboratorios, formación geológica, hidrológica, únicamente se realizó basado en modelos de elevación digital, observación de imágenes obtenidas a partir de teledetección o en campo, posterior a identificar los sitios con propensión alta a presentar movimientos en masa, se evalúa por métodos más detallados cada sitio con el fin obtener resultados con poco margen de error.

7. Conclusiones.

La aplicación de la técnica para determinar el flujo de acumulación para la detección de sitios inestables en los taludes de la vía Bogotá – Villavicencio, permitió conocer su aplicabilidad en una ruta más de las que aqueja al País.

Se logró inicialmente calibrar los valores resultantes de la aplicación de la técnica a uno de los deslizamientos que se presenta en este corredor y que es de grandes magnitudes, sitio 21 del K58 de la vía, para aplicarla a los demás puntos con posible existencia de riesgo, los cuales resultaron de un exhaustivo análisis visual asistido por las herramientas de teledetección y visitas de campo. Este punto continúa siendo el de mayor relevancia, porque se está presentando atención prioritaria a la cara de falla de la ladera; pero no al costado de la quebrada, donde el flujo de acumulación ya superó los 3000 píxeles, marca ruta de drenaje y puede generar represamiento y posterior avalancha.

Además, se logró corroborar la precisión de la técnica con un punto más, sitio 25 del K64 del corredor, que tiene un activo movimiento de tierra y por ende permitió el análisis de los píxeles presentes en cada parte del deslizamiento, conociendo también que los píxeles con valores superiores a 3000 no solo representaban corrientes de agua natural, sino que en casos como este expresaban el punto donde el movimiento en masa había formado un profundo hundimiento. También que al exportarlo al Google Earth coincidía con estructuras hidráulicas existentes.

En los restantes 26 puntos de taludes adyacentes a la vía, en los que se presenta la posibilidad de riesgo por remoción en masa, se determinaron puntualmente 159 zonas que intersecan con la vía, que poseen áreas menores, que presentan flujos de acumulación entre 1500 y 3000 píxeles y que por esto requieren atención. Puntualizadas estos sitios mediante este trabajo pre exploratorio queda para que, con los métodos y estudios morfológicos, litológicos y estructurales establecidos, se continúe y complemente el análisis para ir tamizando que sitios

tienen mayor susceptibilidad a sufrir movimientos en masa bajo todos los criterios, esto a fin de no aplicar estudios a áreas extensas y disminuir los gastos en la fase de estudios.

Con aplicación de la técnica se deja como base la generación de áreas específicas para que se puedan involucrar otras variables detalladas como: la hidrología, geología, sismología; puesto que para el presente trabajo se determinaron las zonas a partir de un modelo de elevación digital, herramientas de teledetección e inspección en campo; pero ya reconocidas las zonas de riesgo se puede ir reduciendo cada vez más las áreas con las nuevas variable involucradas, para plantear así obras civiles de mitigación, reduciendo los costos de estudio y ejecución los proyectos y además garantizando que sean soluciones eficientes.

Así como la orogenia de la cordillera permite conocer su inestabilidad y el inventario nacional de movimientos en masa SIMMA lo expresa, también con el presente estudio se evidencia que la afectación del hombre en la ronda del trazado de este eje vial, es el detonante principal para la generación de deslizamientos. A partir de cada uno de los caminos riales, desforestación para la construcción de viviendas, cambio del uso del suelo para actividades agrónomas y pecuarias, explotación para generación de agregados pétreos y construcciones de obras civiles; se generaban los valores críticos más altos para el flujo de acumulación.

Se deja hasta el alcance de este estudio el paso a paso para la determinación del flujo de acumulación y el análisis de los sitios inestables, para que se continúe con la construcción de nuevos métodos de análisis que permitan el aprovechamiento de los softwares existentes, depende de nosotros el avance de ingeniería y el progreso del país.

8. Referencias.

Álvarez, J., Casalí, M., González, A. y López, J. J. (2005) *ESTIMACIÓN DE LA HUMEDAD SUPERFICIAL DEL SUELO MEDIANTE TELEDETECCIÓN RADAR EN PRESENCIA DE UNA CUBIERTA DE CEREAL*. Universidad Pública de Navarra, Departamento de Proyectos e Ingeniería Rural, Los Tejos, Arrosadía s/n, 31006 Pamplona.

American Psychological Association, APA 7ma (séptima edición). <https://normas-apa.org/>

Casallas, J. P. (2022) *DETECCION DE POSIBLES SITIOS INESTABLES DE TALUDES POR MEDIO DE LA TECNICA DE ACUMULACION DE FLUJO APOYADO EN LOS SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA*. Universidad Nacional de Colombia.

Colfecar (2021). El container. <https://www.colfecar.org.co/el-container-edicion-2021-2/>

Baghdadi N., Mallet C y Zribi M. (2020). *QGIS y las herramientas genéricas*. ISTE Internacional. London, pp 1-6

Código Nacional de Tránsito, *Ley 769 del 2002, Artículo 2*.

Corapcioglu, M.Y. (1984). Land subsidence a state of the art review. *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*. En: Bear and M. Y. Corapcioglu (Ed.), NATO ASI Series E.82, Martinus Nijhott Publishers, 369-444.

Coviandes, (s.f). *Calzada Existente 86 kilómetros de ventajas,*
<https://www.coviandes.com/calzadaexistente#:~:text=El%20proyecto%20de%20la%20v%C3%ADa,carretera%20es%20de%2086%20kil%C3%B3metros>

Cruden, D. M. & Varnes D. J. (1996). *Landslide Types and Processes. In Special Report 247 Landslides Investigation and Mitigation.* Turner, A. K. and Schuster R. L. National Academy Press: Washington, pp. 36-75.

EARTHDATA Search. (s.f). Vertex de la NASA. <https://www.scribbr.es/normas-apa/ejemplos/pagina-web/>

El cuarto Mosquetero (s.f) *El documental que rememora la tragedia de Quebrada Blanca*
<https://elcuartomosquetero.com/el-documental-que-rememora-la-tragedia-de-quebrada-blanca/>

El Espectador (30 de junio de 2020) Derrumbe del kilómetro 58 en la vía al Llano no fue culpa de la granja avícola. <https://www.elespectador.com/economia/derrumbe-del-kilometro-58-en-la-via-al-llano-no-fue-culpa-de-la-granja-avicola-article/>

El Tiempo, (05 de agosto 2003) *REALIZARÁN ESTUDIOS PARA LA QUIÑA.*
<https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1030650>.

ESRI. (s.f). *Cómo funciona Acumulación de flujo*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm#:~:text=Las%20celdas%20con%20una%20acumulaci%C3%B3n%20de%20flujos%20de%200%20son,pueden%20utilizar%20para%20identificar%20crestas>.

ESRI. (s.f). *¿Qué es el GIS?* <https://www.esri.es/es-es/descubre-los-gis/qu-es-sig/que-es-sig#:~:text=Un%20sistema%20de%20informaci%C3%B3n%20geogr%C3%A1fica,usando%20mapas%20y%20escenas%203D>.

ESRI. (s.f). Referencia de la herramienta / Herramientas de geoprocésamiento / Caja de herramientas de Spatial Analyst / Conjunto de herramientas Hidrología / Conceptos del conjunto de herramientas Hidrología *Cómo funciona Acumulación de flujo*. https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.htm#ESRI_SECTION1_5BACBFA3A6CD4647B607C80E759248CE

FOSTER (s.f) *Falso Túnel doble calzada Bogotá-Villavicencio*
<http://www.fosterforms.com/es/sistemas/falso-tunel-doble-calzada-bogota-villavicencio/>

Felicimo, A. (1994). *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. España. Pentalfa Ediciones.

García, 2019, Radio Nacional de Colombia. *Audio. Así es recordada la tragedia de Quebrada Blanca en 1974*. <https://www.radionacional.co/podcast/la-senal-de-la-manana/asi-es-recordada-la-tragedia-de-quebrada-blanca-en-1974>.

Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. & Hutchinson, J. N. (2001). *Review of the classification of landslides of the flow type. Environmental and Engineering Geoscience*, 7: 221-238.

Hutchinson, J. N. (1988). *General Report: Morphological and Geotechnical Parameters of Landslides in relation to Geology and Hydrogeology. Proceedings, Fifth International Symposium on Landslides* (C. Bonnard, ed.), 1: 3-35. Balkema: Rotterdam.

Hutchinson J. N. (1968). *Mass Movement. Encyclopedia of Geomorphology. Reinhold New York*, pp. 688-695.

Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química (Ingeominas). (2002). *Clasificación regional de amenaza relativa de movimientos en masa en Colombia. Ingeominas, Subdirección de Amenazas Geoambientales. Bogotá*

Jumbo, F. A. (2015). *Delimitación automática de microcuencas utilizando datos SRTM de la NASA. Universidad Técnica de Machala - Ecuador.*

Kanungo D.P. (1993) "Studies on slopes, landslides and mass movements in Himalaya, India". Seventh international conference and field workshop on Landslides in Czech and Slovak Republics , pp 35-41.

Mora, A. (2018). *Informe de Asistencia Técnica. Unidad Administrativa Especial de Gestión de Riesgo de Desastres. UAEGRDC. : Subdirección de Reducción de Desastres.(p. 5).*

- Martinez, N.A. (2021). ANÁLISIS MULTITEMPORAL DERRUMBE K58+000 VÍA BOGOTÁ VILLAVICENCIO. UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/39162/MartinezArevaloNestorAlvaro.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mattivi, P., Franci, F., Lambertini, A. y Bitelli, G (2019) *TWI computation: a comparison of different open source GISs*. *Open Geospatial Data, Software and Standards*. 4. 6. 10.1186/s40965-019-0066-y. Universidad de Bolonia, Viale del Risorgimento 2, Bolonia, Italia.
- Montero, J. (2017). *Clasificación de movimientos en masa y su distribución en terrenos geológicos de Colombia*. Publicaciones especiales geológicas. Bogotá, D. C., Colombia.
- Montero, J., Cortés, R. (1989). Clasificación regional de amenaza de deslizamientos, vol.1. Primer Simposio Suramericano de Deslizamientos SCG-CSMM. Paipa, Colombia.
- Montgomery D., Zhang W. (1994). *Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations*. *Advancing Earth and Space Sciences*.
- Montoya callejas, F. (2022). *Guía para determinación de puntos de amenaza de deslizamiento en una ladera con la ayuda de Google Earth, los Sistemas de Información Geográfica, y el programa QGIS 3.14*. 15. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Mora, A. (2019). *La adolescente cordillera Oriental sigue creciendo*. Periódico *El Tiempo por Log*, L. <https://www.eltiempo.com/vida/ciencia/estudio-revela-crecimiento-de-la-cordillera-oriental-en-colombia-399748>

Moreno, Y. Y. (2022) *Aplicación de la técnica, que utiliza el flujo de acumulación, para determinar sitios en los que se puedan pre sentar nuevos deslizamientos, en taludes adyacentes a la Transversal Central del Pacifico Sector Tadó La Virginia*. Universidad Nacional de Colombia. Servicio Geológico Colombiano.

Pineda, C., & Sabogal, L. F. (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*. *Instname:Universidad Santo Tomás*. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/15618>

SAGA, (s.f). *Software*. <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html>

Semana, (28 de julio de 2020). *La mega vía Buenaventura-Puerto Carreño: \$25 billones y túnel de 40 kilómetros*. <https://www.semana.com/economia/articulo/como-es-la-via-buenaventura-puerto-carreno/689463/>

Sharpe, C. F. S., (1938). *Landslide and Related Phenomena*: Columbia University Press, New York. 137p.

Sharpe, C. F. S. (1938). En J. R. Schultz and A. B. Cleaves, 1955, pp. 280-305.

Sika. (s.f). *Túnel El Boquerón Carretera Bogotá - Villavicencio Colombia*
<https://col.sika.com/dms/getdocument.get/ae289705-81b8-3f8b-9785-1ed1973cec62/Tunel%20Boqueron.pdf>

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Ingeniería de Suelos Ltda. Bucaramanga, Colombia.

Terzaghi, K., (1950). *Mechanism of Landslide. En Application of Geology to Engineering Practice* p 83-123, the Geol. Soc. of America, Berkley Volume reprint 1962.

Universidad de Caldas, grupo interdisciplinario con grandes expectativas en el campo de la Geotecnia y su aplicación en los diferentes campos de la INGENIERIA, GEOLOGIA Y INGENIERIA GEOLOGICA. <https://estabilidad-de-taludes7.webnode.es/nosotros/>

Valencia, J. P. (2020). *Seguimiento condiciones de los procesos erosivos en el PR64+200 Y PR64+350*. EDL S.A.S

Varnes D.J. (1958). *Landslides types and processes. Special report 29: Landslides and engineering practice (E.B. Eckel, ed.) HRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 20-47.*

Varnes D.J. (1978). Slope movement types and processes. Special report 176: Landslides: Analysis and control (R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp.11-33.