

Análisis de escenarios de inestabilidad geológicos con enfoque multiamenaza, teniendo en cuenta la susceptibilidad de los elementos de infraestructura expuestos a partir de una valorización cualitativa para el tramo vial ubicado en el PR 80+000 al PR 87+000 de la transversal de Cusiana.

Miguel Ángel Melo Moreno

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Civil
Maestría en Infraestructura vial
Bogotá D.C., Colombia
2024**

Análisis de escenarios de inestabilidad geológicos con enfoque multiamenaza, teniendo en cuenta la susceptibilidad de los elementos de infraestructura expuestos a partir de una valorización cualitativa para el tramo vial ubicado en el PR 80+000 al PR 87+000 de la transversal de Cusiana

Miguel Ángel Melo Moreno

Trabajo de grado para optar por el título de

Magister en Infraestructura Vial

Dirigido por:

Ing., Carlos Eduardo Torres Romero M.Sc

**Universidad Santo Tomás
Facultad de Ingeniería Civil
Maestría en Infraestructura vial
Bogotá D.C., Colombia**

2024

Agradecimiento

Dentro de este espacio, quiero expresar mi gratitud en gran medida a Dios, por cada una de la oportunidades y bendiciones recibidas. Reconocer que este paso, no es gracias solo al esfuerzo que se evidencia o se encuentra plasmado en el presente documento, si no que pertenece a la historia que se encuentra detrás de mis familiares mis abuelos, en especial la memoria de mi abuelita María del Amparo Valero, ya que fundamento los pilares que cuentan mis padres y que a su vez inculcaron y contribuyeron en mi formación.

Deseo expresar el amor y cariño que tengo a cada uno de mis familiares en especial a mis hermanas y mi esposa que me ha acompañado en los últimos 5 años de mi vida. Así mismo quiero expresar total agradecimiento al Ingeniero Carlos Eduardo Torres, que como director del presente trabajo ha sabido sortear los contratiempos que se han presentado.

TABLA DE CONTENIDO

Glosario.....	9
Resumen.....	13
Abstract.....	14
Introducción.....	15
Planteamiento del problema.....	16
Justificación	17
Objetivos.....	18
Objetivo General.....	18
Objetivos Específicos.....	18
Estado del arte.....	19
Internacionales	21
Metodología.....	23
Caracterización de las amenazas.....	24
Obtención de la Información	¡Error! Marcador no definido.
Estructura de la metodología	23
Identificación del Corredor Vial.....	23
Identificación, Descripción y Análisis de las características aledañas al corredor vial...24	¡Error! Marcador no definido.
Zonificación del punto más crítico dentro del corredor vial.....	24
Aplicación y adaptación de los métodos con enfoque mixto cualitativo y Cuantitativo, para la Zonificación de Amenazas.....	25
Amenazas Detonantes:.....	26
Amenazas Condicionantes:.....	26
Amenaza Antrópica:	¡Error! Marcador no definido.
Determinación del grado de Amenaza:.....	26
Identificación y caracterización general del corredor vial	28
Caracterización General.....	28
Caracterización Importancia Corredor Vial.....	29
Identificación, Descripción y Análisis de las Características Aledañas de la transversal de Cusiana.....	30
Geología.....	31
Formación Lutitas de Macanal (KILM).....	31
Depósitos cuaternarios.....	32

Depósitos de Origen Coluvial (Qc).....	33
Depósitos de Origen Aluvial (Qal).	33
Aspectos Estructurales.	33
Geomorfología.....	33
Unidades de Origen Estructural.	34
Ladera Estructural de sierra Sinclinal (Sssle).	34
Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal (Ssslc).	34
Unidades de Origen Denudacional.	34
Cono de deslizamientos indiferenciado (Ddl).....	34
Subunidades de origen Fluvial.....	35
Cauce aluvial (Fca).	35
Terraza aluvial (Fta).....	35
Análisis multitemporal partir de las aerofotografías.....	35
Zonificación del Punto más Crítico Dentro del Corredor Vial	40
Geología.....	47
Grado de Meteorización.....	51
Suelos.....	52
Suelos Residuales de Lutitas de Macanal (Srlm).....	52
Suelos Transportados (St).	52
Suelos Transportados de Depósitos Coluviales (Stdc).	52
Suelos de Depósitos de aluviones recientes (Stal).....	55
Geomorfología.....	55
Definición y Caracterización de las Subunidades y Elementos Geomorfológicos para Ingeniería (UG).	56
Subunidades de Origen Estructural- Denudacional (SD).	57
Las Laderas Estructurales (Sle), ...	57
Las Laderas de Contrapendiente (Slc), ...	57
Subunidades de Origen denudacional (D).	57
Depósitos Coluviales (Dco).	57
Elementos de Origen Fluvial (F).....	58
Identificación, Descripción y Análisis de las Amenazas	59
Lluvias	59
Temperatura	62
Cambios de Temperatura.	63

Elevación de Temperatura.	63
Cambios Estacionales.	63
Sismo	66
Geomorfología	69
Geología.....	70
Aplicación y Adaptación de los Métodos con Enfoque Cualitativo y Cuantitativo, para la	
Zonificación de Amenazas.....	72
Determinación de los Factores Indicadores	72
Factores Condicionantes o de Susceptibilidad.....	72
Factores Detonantes o de disparo	72
Determinación de Amenaza de deslizamientos	73
Análisis de los factores	73
Índice de Influencia Geomorfológico y Geológico.	76
Índice de Influencia de la humedad Usual del Suelo.	79
Índice de Influencia de la Intensidad Sísmica.....	81
Índice de Influencia de intensidad de Lluvias.....	83
Resultados	85
Determinación amenaza de deslizamiento.....	85
Potencial generador de deslizamiento por lluvias.....	85
Potencial generador de deslizamiento por Sismo.	86
Evaluación de la Amenaza de los elementos de infraestructura expuesto.	92
Conclusiones	94
Principales Hallazgos:.....	95
Contribuciones del estudio:.....	96
Recomendaciones	97
Socio económicos	97
Bibliografía	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización transversal de Cusiana Respecto a la Ruta Nacional 62.	28
Figura 2. Corte A-A' Geología de la Plancha 211 Tauramena	32
Figura 3. Corte B-B' Geología de la Plancha 211 Tauramena.	33
Figura 4. Seccion Transversal típica de la Transversal de Cusiana.	41
Figura 5. Mapa Registro pluviométrico máximo en 24h (1990-2006)	60
Figura 6. Mapa Registro pluviométrico máximo en 24h (2007-2023).	61
Figura 7. Mapa Proyección Pluviométrica máxima en 24 h (2050-2060).	62
Figura 8. Mapa Registro de Temperatura (1990-2006).	64
Figura 9. Mapa Registro de Temperatura (2007-2023)	65
Figura 10. Mapa Proyección Temperatura (2024-2054).	66
Figura 11. Registro Sísmico (1993-2018).	67
Figura 12. Registro Sísmico (2018-2023).	68
Figura 13. Mapa Sismicidad (1993-2023).	68
Figura 14. Mapa Geomorfológico.	69
Figura 15. Mapa Geológico.	71
Figura 16. Mapa de la rejilla del Relieve relativo.	75
Figura 17. Mapa del Índice de Relieve relativo	76
Figura 18. Mapa del Índice de Influencia de Geología y Geomorfología.	79
Figura 19. Mapa del Índice de Influencia del factor de Humedad.	81
Figura 20. Mapa del Índice de Influencia del factor sísmico.	82
Figura 21. Mapa del Índice de Influencia de lluvias.	83
Figura 22.	85
Figura 23. Mapa potencial generador de deslizamiento por sismos.	86
Figura 24. Mapa de Amenaza de deslizamientos.	87
Figura 25. Capa de Geomorfología de la zona.	89
Figura 26. Capa potencial generador de deslizamiento por lluvias.	90
Figura 27. Capa potencial generador de deslizamiento por Sismos.	91
Figura 28. Capa Análisis de deslizamiento	92

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Determinación del grado de amenaza</i>	26
Tabla 2. Caracterización corredores viales Paralelos a la transversal de Cusiana.	29
Tabla 3. Relación de la información de las aerofotografías tomadas en los años 70' y 80 por el IGAC... 36	36
Tabla 4. Análisis multitemporal del tramo vial a partir de aerofotografías de los años 1979 y 2022..... 38	38
Tabla 5. Características geométricas de la transversal de Cusiana.	40
Tabla 6. Descripción del estado de los elementos de Infraestructura que se encuentran dentro del tramo en estudio.	41
Tabla 7. Interpretación y descripción de formaciones Geológicas.	48
Tabla 8. Interpretación y descripción de los suelos.	53
Tabla 9. Rangos de Inclinación de la ladera.	56
Tabla 10. Interpretación y descripción de la geomorfología aledaña al tramo vial.	58
Tabla 11. Estaciones Climáticas aferentes al área de Estudio.....	63
Tabla 12. Índice de influencia de relieve relativo.....	74
Tabla 13. Índice de influencia Geomorfológico.	77
Tabla 14. Índice de influencia Geológico.	78
Tabla 15. Clasificación de los promedios mensuales máximos.	80
Tabla 16. Índice de influencia del factor humedad.	80
Tabla 17. Índice de influencia Sísmica.	82
Tabla 18. Índice de intensidad de lluvias.	83
Tabla 19. Clasificación de Amenaza de deslizamiento.....	87
Tabla 20. Evaluación de la Amenaza de los elementos de infraestructura expuestos.	93

Glosario

Mediante el presente glosario se da a conocer las definiciones básicas que se abarcan en el documento, facilitando de esta manera la comprensión del alcance del proyecto.

Amenaza

La amenaza se encuentra ligada a la probabilidad de ocurrencia de un evento antrópico o natural potencialmente desastroso que durante cierto periodo de tiempo puede ocurrir en un sitio dado.

Análisis y evaluación del riesgo

Implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir. Es el modelo mediante el cual se relacionan la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades. (Congreso de la República de Colombia, 2012)

Desastre

Es el resultado que se desencadena de la manifestación de uno o varios eventos naturales o antropogénicos no intencionales que al encontrar condiciones propicias de vulnerabilidad en las personas, los bienes, la infraestructura, los medios de subsistencia, la prestación de servicios o los recursos ambientales, causa daños o pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, generando una alteración intensa, grave y extendida en las condiciones normales de funcionamiento de la sociedad, que exige del Estado y del sistema nacional ejecutar acciones de respuesta a la emergencia, rehabilitación y reconstrucción. (Congreso de la República de Colombia, 2012)

Emergencia

Situación caracterizada por la alteración o interrupción intensa y grave de las condiciones normales de funcionamiento u operación de una comunidad, causada por un evento adverso o por la inminencia de este, que obliga a una reacción inmediata y que requiere la respuesta de las instituciones del estado, los medios de comunicación y de la comunidad en general. (Congreso de la República de Colombia, 2012).

Elemento Expuesto

Componente estructural, ingenieril, poblacional, económico u o instalación pública o privada que se encuentra ubicada en el área de amenaza.

Geodatabase

Es la estructura de datos nativos de ArcGIS y es el formato de datos primario para la edición y la administración de datos.

Intervención correctiva

Proceso cuyo objetivo es reducir el nivel de riesgo existente en la sociedad a través de acciones de mitigación, en el sentido de disminuir o reducir las condiciones de amenaza, cuando sea posible, y la vulnerabilidad de los elementos expuestos.

Inundaciones

Son desbordamientos de agua en lugares que normalmente se encuentran sin agua, se producen por fuertes precipitaciones, desbordamientos, deshielos o por el derretimiento de una intensa nevada.

Incendio

Se le denomina incendio a la combustión descontrolada sobre diferentes áreas como viviendas, bosques, selvas y todo tipo de superficies que contengan componentes fundamentales del triángulo del fuego.

Manejo de desastres

Es el proceso de la gestión del riesgo compuesto por la preparación para la respuesta a emergencias a preparación para la recuperación, la ejecución de dicha respuesta y la ejecución de la respectiva recuperación, entiéndase: rehabilitación y recuperación.

Movimiento en Masa

Son aquellos movimientos de ladera debajo de una masa de roca, de detríticos o de tierras por efectos de la gravedad. De Igual manera, equivale a definiciones tales como procesos de remoción en masa, fenómenos de remoción en masa o fallas de taludes y laderas

Multiamenaza

Interacción y potenciación de múltiples factores Geológicos, Geomorfológicos, Sismos y climáticos que se correlacionan entre sí, presentando un desafío complejo para las autoridades, ya que se requiere una respuesta integral que aborde todos los factores que lo generan.

‘Preparación

Es el conjunto de acciones principalmente de coordinación, sistemas de alerta, capacitación, equipamiento, centros de reserva y albergues y entrenamiento, con el propósito de optimizar la ejecución de los diferentes servicios básicos de respuesta, como accesibilidad y transporte, telecomunicaciones, evaluación de daños y análisis de necesidades, salud y saneamiento básico, búsqueda y rescate, extinción de incendios y manejo de materiales peligrosos, albergues y alimentación, servicios públicos, seguridad y convivencia, aspectos financieros y legales, información pública y el manejo general de la respuesta, entre otros

Probabilidad

La probabilidad del riesgo mide la frecuencia o factibilidad de los periodos de retorno de ocurrencia de un evento que genera inestabilidad. Para cada una de las amenazas que se presentan en región de sugamuxy se verificaron los registros históricos.

Recuperación

Son las acciones para el restablecimiento de las condiciones normales de vida mediante la rehabilitación, reparación o reconstrucción del área afectada, los bienes y servicios interrumpidos o deteriorados y el restablecimiento e impulso del desarrollo económico y social de la comunidad. La recuperación tiene como propósito central evitar la reproducción de las condiciones de riesgo preexistentes en el área o sector afectado.

Reptación.

Consiste en movimientos del suelo subsuperficial desde muy lentos a extremadamente lentos sin una superficie definida de falla. La profundidad del movimiento puede ser desde pocos centímetros hasta varios metros. Generalmente, el desplazamiento horizontal es de unos pocos centímetros al año y afecta a grandes áreas de terreno. (Suárez Díaz, 2009, pág. 12)

Riesgo

Magnitud de probabilidad que una amenaza o situación peligrosa se convierta en un desastre, asumiendo una vulnerabilidad frente al peligro.

Shape

Archivos que almacenan información geométrica de los elementos de la capa en formato vertical. Pueden contener puntos, líneas o polígonos y cada vértice que lleva implícitas sus coordenadas en un sistema de georreferenciación.

Sismos

Se le denomina a la serie de movimientos que se generan en la superficie terrestre, debido al desplazamiento o roce que pueden presentar las placas internas de la tierra, en ocasiones estos pueden actuar como detonantes para otras amenazas.

Susceptibilidad

Condición propicia con una alta probabilidad que un evento puede ocurrir dado el estado de vulnerabilidad de un elemento.

Frágil, Sensible, delicado

Vulnerabilidad

Corresponde a la incapacidad, debilidad y fragilidad que cuenta los elementos que interactúan con la infraestructura para resistir o mitigar una amenaza. De acuerdo con lo anterior se evaluó de manera visual el estado y las condiciones de los diferentes elementos que hacen parte de la estructura vial junto las características físicas de la vía, y las diferentes metodologías necesarias para prevenir el riesgo o desastre.

Resumen

La investigación realizada tuvo como objetivo evaluar integralmente los escenarios de inestabilidad geológicos con enfoque multiamenaza en el tramo vial comprendido entre el PR 80+000 Y el PR 87+000 de la transversal de Cusiana, considerando la susceptibilidad de los elementos de infraestructura expuestos. El análisis plantea la zonificación de las áreas más susceptibles a movimiento en masa dentro de la transversal de Cusiana, vía que comunica a los departamentos de Boyacá y Casanare, entre los municipios de Sogamoso y Aguazul. Mediante una metodología que se fundamenta en la combinación y adaptación de diferentes métodos con enfoque cualitativo y cuantitativo, apoyándose en las bases de datos de cada una de las entidades encargadas en el manejo de información científica básica, junto con el Sistema de Información Geográfica ArcGIS.

De acuerdo a la visita de campo, en la cual se realizó un recorrido desde el PR0+000, hasta PR116+000 de la transversal de Cusiana, junto con varios sobrevuelos en dron y el análisis de la fotointerpretación de aerofotografías tomadas por el IGAC. Se identificó y delimito que la zona de estudio con mayor cantidad de movimientos en masa se encuentra en el tramo del PR 80+000 al PR87+000.

Conforme a lo anterior se realizó la implementación y adaptación de las guías metodológicas para la zonificación de amenazas por movimientos en masa colombiano (SGC) y la metodología de Mora & Vahrson (1992), obteniendo la zonificación detallada de la amenaza por movimientos en masa.

Palabras clave: multiamenaza, riesgo, pavimento, correlación, Superposición, oportunidad.

Abstract

The objective of the research carried out was to comprehensively evaluate the multi-hazard scenarios in the road section between PR 80+000 and PR 87+000 of the Cusiana intersection, considering the susceptibility of the exposed infrastructure elements. The analysis proposes the zoning of the areas most susceptible to mass movement within the Cusiana transversal, a road that connects the departments of Boyacá and Casanare, between the municipalities of Sogamoso and Aguazul. Through a methodology that is based on the combination and adaptation of different methods with a qualitative and quantitative approach, relying on the databases of each of the entities in charge of managing basic scientific information, together with the ArcGIS Geographic Information System.

According to the field visit, in which a tour was made from PR0+000 to PR116+000 of the Cusiana transversal, along with several drone flights and the analysis of the photointerpretation of aerial photographs taken by the IGAC. . It was identified and delimited that the study area with the greatest number of mass movements is located in the section from PR 80+000 to PR87+000.

In accordance with the above, the implementation and adaptation of the methodological guides for the zoning of threats due to Colombian mass movements (SGC) and the methodology of Mora & Vahrson, (1992). obtaining the detailed zoning of the threat due to mass movements.

Keywords: multi-hazard, risk, pavement, correlation, Overlay, opportunity.

Introducción

El mundo de la información geográfica ha experimentado una transformación radical en las últimas décadas, y en el centro de esta revolución se encuentran los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Desde sus humildes inicios hasta su sofisticación actual, los SIG han recorrido un largo camino, impulsados por la convergencia de factores como la creciente necesidad de información espacial, el auge de la tecnología informática y la imperiosa necesidad de comprender y gestionar mejor nuestro planeta.

El uso de los Sistemas de Información Geográfico, para el análisis de escenarios multiamenaza, se ha convertido en una herramienta fundamental para la gestión de riesgo por deslizamientos en zonas vulnerables, especialmente en áreas donde se encuentra una orogénesis joven, suelos altamente meteorizados y geomorfológicamente inestables, características similares que se presentan en gran medida en los corredores que sobrepasan en flanco Este de la cordillera oriental de Colombia.

Planteamiento del problema

Los trayectos viales que comunican el resto del país con el piedemonte llanero deben cruzar la cordillera oriental, esta se caracteriza por tener una alta complejidad geológica debido a que su orografía es la más joven de las tres cordilleras. Haciendo que atravesarla mediante proyectos de infraestructura convencionales sea toda una odisea, además la estratigrafía de esta cordillera no se encuentra consolidada haciendo que se presenten diferentes fenómenos de remoción en masa.

Sumado a esto se encontraba la inexperiencia del estado para la formulación y planeación de la primera generación de concesiones, dentro de esta se encontraba una serie de protecciones por parte del gobierno para garantizar la entrada económica de cada concesionario y solventar las entradas reales que se percibían por el recaudo en peajes.

Las formas de compensación en caso de que existiera una contingencia, iban desde el aumento de las tarifas que se imponían en los peajes hasta los resarcimientos con recursos propios por parte del INVIAS. El estado al asignar las concesiones viales no contaba con diseños a nivel de detalle, los predios no se habían adquirido en su totalidad, los trámites para obtener las licencias ambientales para la ejecución de los proyectos apenas se iniciaban a exigir.

Igualmente se sigue presentando que, para la planeación, formulación y elaboración de proyectos de consultoría, conjunto a los proyectos de construcción que comunican la región Orinoquia con el resto el país, no se ejecutan de manera armoniosa para realizar la cuantificación de las variables multiamenaza, donde deberían tener en cuenta el sector ambiente, geológico, social y económico que inciden en la valorización cualitativa y cuantitativa del riesgo.

De esta manera los inconvenientes económicos y financieros para la ejecución de los proyectos viales deben ser priorizados ya que, al no contar con el capital suficiente, se omiten muchas variables con el objetivo de acelerar y tramitar el desarrollo constructivo de estos.

Justificación

Se realiza el presente trabajo motivado a los diferentes inconvenientes que se han presentado en las obras de infraestructura que hacen parte del tramo vial en estudio, afectadas por deslizamientos y movimiento en masa, teniendo como consecuencia el colapso del viaducto los Grillos, Puente Berbeno, Puente Quebrada Negra y el puente la Orquídea.

De acuerdo con el potencial económico, cultural, ecosistémico, turístico y gastronómico que cuenta los llanos orientales. El centro del país ha buscado diferentes alternativas para plantear rutas terrestres que logren comunicarse con esta importante región del país. Solo hasta en 1936 Colombia culmino las obras que comunican la capital del meta, con la capital del país.

Para 1994 el gobierno nacional a través del Instituto Nacional de Vías adjudico el primer grupo de concesiones del país. La malla vial del meta tenía como objetivo conectar el centro neural del país (Bogotá) con la región de mayor crecimiento económico (Llanos Orientales). El estado colombiano evidencio que los recursos que contaba para mantener las vías ya existentes y construir la nueva infraestructura, que requería el país no eran suficientes, por lo cual opto por implementar esta modelo de contratación británico.

Para atraer la inversión de los privados la primera generación de concesiones tuvo garantías muy generosas para cubrir la diferencia entre los ingresos reales y los asegurados en los contratos. Además, los mecanismos de compensación en caso de activación de las contingencias incluían el aumento del plazo de la concesión, el aumento del peaje y por último la compensación directa con recursos del invias.

Acto seguido no se tuvieron en cuenta todos los riesgos geotécnicos, geomorfológicos y de multiamenaza que se podrían presentar en un proyecto que pudiera conquistar y atravesar la cordillera oriental con todo el confort para transitar sobre ella.

Es por esto que el análisis de los escenarios viales con el enfoque multiamenaza permite tener un concepto completo del riesgo al evaluar las pérdidas económicas directas que se podrían presentar si se materializa la amenaza, las pérdidas de vidas humanas, las pérdidas de viviendas aledañas, las consecuencias económicas de tener los tramos cerrados.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar integralmente los escenarios de inestabilidad Geológicos con enfoque multiamenaza, teniendo en cuenta la susceptibilidad de los elementos de los elementos de infraestructura expuestos a partir de una valorización cualitativa para el tramo vial ubicado en el PR 80+000 y el PR 87+000 de la transversal de Cusiana.

Objetivos Específicos

- ✓ Delimitar la zona de estudio conforme a los eventos históricos presentados, con el fin de comprender y enfocar la investigación en el área más susceptible.
- ✓ Evaluar cuantitativa y cualitativamente las amenazas condicionantes y detonantes, que se presentan en el corredor vial en estudio, para así establecer el algebra de mapas.
- ✓ Aplicación y adaptación de los métodos con enfoque mixto cualitativo y cuantitativo, mediante el Sistema de Información Geográfico ArcGIS, para identificar dentro de la zona de estudio, el área más susceptible.

Estado del arte

La distribución económica, social, y política en Colombia a diferencia de los países desarrollados se encuentra en mayor proporción en la región centro, haciéndose dispendioso la comunicación entre los centros urbanos y de producción con las zonas de puertos marítimos. Esto ha hecho que el gobierno nacional durante sus últimas administraciones haya formulado proyectos viales para mitigar las grandes distancias y los problemas sísmicos topográficos, geológicos y geotécnicos que presentan en sus tres cordilleras.

El país cuenta con tres alternativas para dirigirse hacia la región Orinoquia las cuales deben atravesar la cordillera oriental, siendo esta la más joven y con mayores inconvenientes de estabilidad geológica de las tres cordilleras que atraviesan de Sur a Norte el país.

La evaluación de la vulnerabilidad, Magnitud y probabilidad de ocurrencia de un fenómeno natural se encuentra ligado con la ubicación y distribución de las unidades de vivienda, Industrial, comercio y unidades de equipamientos de servicios públicos. La evaluación de las amenazas y riesgos se encuentra precedida de los planes de Ordenamiento Territorial (POT).

De acuerdo con lo anterior, en Colombia se da inició a la sistematización de los registros telúricos, con ocasión al terremoto que se presentó en 1983 en la ciudad de Popayán, además el estado por primera vez expidió normas tendientes a definir su responsabilidad frente a este tipo de eventos creando la Corporación para la Reconstrucción y el Desarrollo del Departamento del Cauca (CRC) y el Fondo Nacional de Calamidades, Lo cual llevó a cabo posteriormente mediante Decreto- Ley 1574 de 1984.

Para el año de 1985, meses antes de la tragedia ocurrida en el municipio de Armero. INGEOMINAS (Instituto Geológico de Colombia) y la Defensa Civil Colombiana, dirige una investigación en el volcán del Ruiz asistida por la UNESCO y la Universidad de Islandia para conformar un equipo técnico especializado para realizar el seguimiento a las actividades volcánicas anormales que se presentaban.

La investigación concluye que se debe realizar un monitoreo continuo y un mapa de riesgos junto con un plan de emergencias especial para el riesgo volcánico. En el cual se le informó a la opinión pública que existía un 100% de probabilidad de una erupción que generara flujos de lodo potencialmente destructivos con grandes perjuicios a las poblaciones de Armero, Mariquita, Villa Hermosa y el Líbano.

Posteriormente a las investigaciones e informes realizados por parte del INGEOMINAS, referente al desastre ocurrido en el municipio de Armero. El gobierno nacional crea Mediante el Decreto 919 de 1989 el Sistema Nacional para la prevención y atención de desastres. Constituido por un conjunto de entidades públicas y privadas que realizan planes y programas que dan soluciones a los problemas que presentan los fenómenos naturales o antrópicos, en las fases de prevención, rehabilitación, reconstrucción y desarrollo. Garantizando un manejo oportuno y eficiente de todos los recursos humanos técnicos, administrativos, y económicos.

Consecutivamente a los desastres ocurridos en el municipio de Popayán y Armero. Colombia desarrolla la ley 388 de 1997 (ley de Desarrollo territorial) la cual actualiza las disposiciones establecidas en la ley 9 de 1989, donde dispone de espacios y tiempos específicos para que las comunidades participen en el desarrollo de los planes de ordenamiento territorial (POT) en conjunto a la responsabilidad de los alcaldes municipales.

El ingeniero Jaime Suarez Diaz, en el año 2009 presenta los dos volúmenes de análisis geotécnico los cuales recopila toda la información necesaria para realizar el análisis de estabilidad de laderas y taludes teniendo en cuenta los factores de resistencia al corte en suelos y rocas, el efecto del agua, efecto del sismo, efecto de la geología, zonificación y susceptibilidad amenaza y deslizamientos.

Una vez se desarrollaron los planes de ordenamiento territorial donde participaban entidades públicas, administrativas de prevención de desastres y comunidades. El gobierno nacional solicito a todos los municipios mediante la ley 1523 de 2012, la actualización de los POT, donde los municipios mediante las leyes contratación, adquirió los servicios de entidades especializadas como universidades para el acompañamiento para la formulación y evaluación de los fenómenos naturales que pueden alterar la paz y tranquilidad de los ciudadanos que habitan dentro de su perímetro, estas evaluaciones sirvieron como insumo para la parametrización de las zonas habitables, industria, comercio y las zonas más vulnerables y propensas a sufrir riesgos naturales.

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) para el año 2017 realiza un documento que establece un procedimiento estandarizado para evaluar y clasificar el riesgo de ocurrencia de movimientos en masa en un territorio determinado. Su objetivo principal es apoyar la gestión del riesgo en la planificación territorial, la metodología propuesta dentro de la GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1: 25.000, cuenta con un enfoque

multicriterio que integra el análisis de diversos factores que influyen en la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa.

Para el año 2020 La concesionaria vial andina (CONALVIAS) presenta el *PLAN DE GESTIÓN DE RIESGOS DE DESASTRES DE LAS ENTIDADES PUBLICAS Y PRIVADAS, para la vía Bogotá-Villavicencio*, en el cual implementa una metodología para analizar los riesgos de origen natural, antrópico sobre la infraestructura, implementando planes de emergencia y contingencia, basándose en la Norma NTC-IEC-ISO-31010 de 2013.

Internacionales

La comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) realizó el acompañamiento para la evaluación y estimación de las pérdidas económicas, sociales y ambientales que se han presentado en los diferentes desastres naturales en más de 28 naciones, en los últimos 49 años, registrando aproximadamente 310.000 fallecimientos y 30 millones de personas afectadas con un costo de más de 260 mil millones de dólares.

CEPAL durante los últimos 30 años ha desarrollado el Manual *para la Evaluación de Desastres* en el cual establece en la primera sección, los conceptos y estimaciones de los desastres. En la segunda sección cuantifica los efectos sociales. En la tercera sección cuantifica los efectos de los desastres en el sector infraestructura, en la cuarta se focaliza en los sectores productivos, en la quinta y última sección se dedica a las consecuencias transversales de los desastres tales como los impactos en las variables macroeconómicas.

Otra de las entidades internacionales que ha realizado evolución de las amenazas ha sido La Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) de los Estados Unidos de América, donde divulgó para el año de 1997, una metodología para la evaluación de riesgos enfocada en la estimación y simulación de daños ocasionados por, Terremotos, inundaciones, Huracanes y tsunamis, valorando los impactos físicos económicos y sociales. Mediante el software HAZUS MH el cual recolecta y ordena un inventario de datos, mostrando como resultado reportes mapas detallados de la interposición de información.

En Europa se desarrolló a partir de la metodología implementada por el Software HAZUS MH. La evaluación modular de riesgos por posibles eventos sísmicos en zonas urbanas, donde en primera instancia a partir de información recopilada de elementos expuestos y clasificación del tipo de ocupación, se agrupan

los diferentes tipos estructurales en tipologías con similares características de comportamiento ante eventos sísmicos.

En España (Bonachea,2006) realizó el Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debido a los Procesos Geomorfológicos, en el cual designo las zonas que tenían mayor probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa.

Por otra parte, en Italia (Van Den Eeckhaut et al,2009) realizo un inventario de riesgos para desarrollar mapas susceptibilidad a deslizamientos, necesarios para apoyar la gestión de emergencias e identificar las áreas con mayor potencial a sufrir graves daños por movimientos de masa, permitiendo producir mapas de susceptibilidad de deslizamientos de tierra, con cierta fluidez

Guatemala por medio de la Universidad de San Carlos, realiza el análisis de riesgo y vulnerabilidad en proyectos de carreteras. En el cual toma como datos de partida el historial de las amenazas de la zona para así realizar el pronóstico. Toman la carretera CA-1 Occidente entre los puntos de los encuentros en el Km 127+300 y Nahuala en el Km 158+150, para realizar el análisis de riesgo y vulnerabilidad a deslizamientos, Flujos de lodo y crecidas de ríos. (Palma,2012).

Metodología

La metodología propuesta para el análisis de escenarios de inestabilidad Geológicos con enfoque multiamenaza del corredor vial ubicado en el PR 80+000 al PR 87+000 de la vía transversal de Cusiana, se fundamenta en la combinación y adaptación de diferentes métodos con enfoque mixto Cualitativo y Cuantitativo (Mora Vahrson), junto las características principales que se encuentran descritas en las guías metodológicas de la zonificación de amenazas por movimientos en masa del servicio Geológico colombiano a escala 1:25000 y 1:100.000.

El desarrollo de la metodología que se implementa se fundamenta mediante cinco etapas.

Estructura de la metodología

Primera Etapa

Identificación del Corredor Vial.

Consiste en la identificación del corredor vial, caracterizando la importancia que representa al comunicar los llanos orientales con el resto del país. Asu vez se realiza la correlación de los diferentes corredores viales que comunican el centro del país con la región Orinoquia.

Segunda Etapa

Identificación, Descripción y Análisis de las características aledañas al corredor vial.

Se realiza la identificación, descripción y análisis de las características geológicas y geomorfológicas aledañas de la transversal de cusiana, de acuerdo con la información obtenida en sitio y bases de datos de las entidades gubernamentales que tienen el objetivo el monitoreo y seguimiento de los diferentes recursos naturales, como lo son el Instituto de Hidrología Meteorología Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), Servicio Geológico Colombiano (SGC), identificando las múltiples amenazas que tienen incidencia en la zona, según su frecuencia, impacto y riesgo.

Obteniendo la información de la siguiente manera:

- Análisis Multitemporal a partir de imágenes satelitales (Google Earth Pro)
- Análisis del registró fílmico aéreo de la zona de estudio (Sobre Vuelo Con Dron)
- Análisis probabilístico de los factores detonantes a partir de información que se encuentra registrada por parte de las entidades gubernamentales que tienen como objetivo el monitoreo y

seguimiento de los diferentes recursos naturales, como el Instituto de Hidrología Meteorología Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), Servicio Geológico Colombiano (SGC).

- Análisis de la modelación de los factores detonantes, condicionantes y antrópicos en sistemas de información georreferenciada (ArcGIS)

Caracterización de las amenazas

Dentro de la caracterización y clasificación de las diferentes amenazas según las metodologías mencionadas, se evidencia que los peligros latentes que cuentan con incidencia en la zona de estudio se clasifican en:

Amenazas detonantes: lluvias, Sismos, Cambio climático.

Amenazas Condicionantes: Geología, Geomorfología, Geológicos , drenaje.

Amenazas Antrópicas: Deforestación, Agricultura, Cambios de cobertura del suelo.

Tercera Etapa

Zonificación del punto más crítico dentro del corredor vial.

Se realiza la zonificación del punto más crítico dentro del corredor transversal de cusiana. Teniendo en cuenta cada uno de los factores que presentan incidencia dentro de las afectaciones de las estructuras que hacen parte del tramo vial en estudio.

Dentro de la transversal de Cusiana el punto que presenta la mayor cantidad de manifestaciones de desastres naturales es el PR 80+000 al PR 87+000.

Se realizó la Fotointerpretación de aerofotografías tomadas por el IGAC en diferentes épocas y a diferentes escalas, con la elaboración de los planos correspondientes con la definición de la cartografía de las unidades geológicas, geomorfológicas y procesos morfodinámicos presentes en el corredor en estudio junto con la descripción del estado de cada uno de los elementos de infraestructura que fueron dispuestos por parte de las entidades gubernamentales.

Identificación, Descripción y Análisis de las amenazas que influyen dentro de los elementos expuestos en el corredor vial.

- **Amenazas detonantes:** lluvias, Sismos, Cambio climático.

- **Amenazas Condicionantes:** Geología, Geomorfología, drenaje.
- **Amenazas Antrópicas:** Deforestación, Agricultura, Cambios de cobertura del suelo.

Una vez lograda la identificación y estructuración de manera ordenada y lógica de cada uno de los factores condicionantes; conforme a las metodologías descritas por parte del Servicio Geológico Colombiano y la información dispuesta en las bases de datos de las diferentes agencias gubernamentales (Información en la nube, Planchas Geográficas, Geomorfológicas, Imágenes Satelitales) junto con información tomada en campo; se logró caracterizar cada uno de los componentes condicionantes.

De acuerdo a lo anterior se da continuidad con el análisis de los factores detonantes que influyen en el desarrollo del riesgo de deslizamiento en el tramo vial en estudio, para lo cual se plantea la generación de mapas que identifique evalúen las condiciones de los factores que inciden en la multiamenaza; mediante la herramienta informática de sistemas de información geográfica SIG (ArcGis). Dentro de esta se desarrolla la evaluación del régimen de lluvias durante los últimos 30 años y de igual forma la evaluación de los sismos en el mismo periodo de tiempo, Obteniendo la información necesaria mediante procesos estadísticos para determinar y simular el posible comportamiento de estos factores en los próximos 20 años.

Conforme a la Propuesta Metodológica Sistemática para la generación de mapas Geomorfológicos Analíticos aplicados a la zonificación de Amenazas por Movimientos en masa, 2012, SGC. que presenta elementos metodológicos, guías para la elaboración de los mapas temáticos en los estudios de zonificación de amenazas por movimientos de remoción en masa. Se realizará cada uno de los mapas temáticos identificando cada uno de los índices que se requiere en la metodología de microzonificación de amenazas por deslizamiento de Mora & Vahrson teniendo en cuenta el uso de suelo y la cobertura del suelo.

Cuarta Etapa.

Identificación y descripción de los criterios que determinan la asignación de valores.

Se realiza la identificación y descripción de los criterios que determinan la asignación valores, en una escala de 1 a 5 de cada uno de los factores condicionantes y detonantes de acuerdo al nivel de susceptibilidad a deslizamiento y movimientos en masa. Apoyado mediante imágenes satelitales, registro fílmico (dron), Guías metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la herramienta informática de Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS).

Aplicación y adaptación de los métodos con enfoque mixto cualitativo y Cuantitativo, para la Zonificación de Amenazas.

Amenazas Detonantes:

- a. Identificación del Índice de lluvias Intensas
 - i. Identificación de lluvias máximas diarias anuales
- b. Identificación del Índice de Influencia de Actividad Sísmica
 - i. Clasificación de los sismos en la escala de Richter Identificada
- c. Identificación del Índice de Cambio Climático.
 - i. Cálculo de la proyección del régimen de lluvias para el año 2050
 - ii. Cálculo de la proyección de la temperatura para el año 2050

Amenazas Condicionantes:

- d. Identificación del Índice Relativo del relieve
 - i. Definición de las medidas y del área de cada celda o pixel que hace parte de la zona de estudio.
 - ii. Definición de la diferencia de elevación dentro de cada celda.
- e. Identificación del Índice de Influencia litológico
 - i. Se realiza la valorización de inestabilidad y susceptibilidad conforme a la litología de cada celda o pixel que hace parte de la zona de estudio.
- f. Identificación del Índice de Influencia de Influencia de la Humedad del suelo.
 - i. Clasificación de los promedios mensuales máximos de precipitación.
 - ii. Clasificación y ponderación anual.
- g. Identificación y clasificación del Índice Geológico

Determinación del grado de Amenaza:

- h.** La obtención del grado de amenaza se obtiene a partir de la ponderación de cada uno de los índices que se encuentra dentro de cada celda o pixel, que hace parte de la zona de estudio.

Tabla 1. *Determinación del grado de amenaza*

Tabla 1.

Determinación del grado de Amenaza.

Descripción	Escala	Índice de Amenaza
Riesgo bajo de daño. Es probable que el evento no cause daños significativos.	Riesgo Bajo	1
Riesgo moderado. Es posible que el evento cause daños a la propiedad o lesiones leves	Riesgo Moderado	2
Riesgo alto. Es probable que el evento cause daños a la propiedad o lesiones graves.	Riesgo Alto	3
Riesgo muy alto. Es probable que el evento cause daños extensos a la propiedad y lesiones graves o la muerte.	Riesgo muy Alto	4
Riesgo extremo. Es probable que el evento cause daños catastróficos y numerosas muertes.	Riesgo Extremo	5

Elaboración Propia. Fuente Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Quinta Etapa.

Aplicación y adaptación de la metodología Mora - Vahrson

Se realiza la aplicación y adaptación de la metodología Mora –Vahrson que se fundamenta en la creación de mapas según cada factor u o amenaza, donde cada pixel que hace parte del mapa representa el valor asignado de cada factor con ubicación específica. Se da continuidad con la superposición y correlación de cada mapa anteriormente realizado, permitiendo la combinación de cada factor en un único mapa, mediante el Sistema de Información Geográfico ArcGIS, obteniendo como resultado la zona con mayor susceptibilidad dentro del corredor en estudio, permitiendo evidenciar diferentes alternativas para el diseño del trazado del corredor vial, así sobre pasando todas las dificultades que se presentan en el Área.

Palabras clave: multiamenaza, riesgo, pavimento, correlación, Superposición, oportunidad.

Identificación y caracterización general del corredor vial

En el presente capítulo se realiza la caracterización del tramo vial en estudio y la correlación que existe entre la Ruta Nacional 62 y los corredores viales que comunican los llanos orientales, además se realiza la descripción del impacto que genera las actividades económicas que se desarrollan en el área. Así mismo, se realiza una caracterización de los aspectos económicos, de las provincias y departamentos que atraviesa.

Caracterización General

La Ruta Nacional 62 cuenta con una longitud de 835 km, iniciando su trazado en el Golfo de Urabá atravesando el país de oriente a occidente y viceversa, esta se subdivide en 11 tramos viales; comunicando las siguientes Ciudades y Municipios: Turbo, Medellín, Puerto Araujo, Tunja, Duitama, Sogamoso y Yopal.

La transversal de Cusiana corresponde al último tramo vial de los once tramos viales que hacen parte de la Ruta Nacional 62; con una longitud de 116 km, es decir, un 15% de la totalidad de la longitud de la ruta. La zona objeto de estudio, se encuentra ubicada entre los PR80+000 y PR87+000 de la transversal de Cusiana, conectando los Municipios de Sogamoso y Agua Azul, y cuenta con la mayor susceptibilidad al riesgo.

Figura 1.

Localización de zona de la zona de estudio Respecto transversal de Cusiana y la Ruta Nacional 62.



Elaboración Propia. Fuente: Instituto Nacional de Vías (Invias)

A continuación, se describen diferentes corredores viales que comunican la zona centro con la zona oriental del país; describiendo características generales de cada corredor.

Tabla 2.

Caracterización corredores viales Paralelos a la transversal de Cusiana.

No	Nombre de la Ruta	Longitud	Tipo de Vía	Ruta	Tipo de Trafico
Cundinamarca - Meta					
1	Autopista al llano, Bogotá-Villavicencio (Chipaqué, Cáqueza, Guayabetal)	92 km	Vía Nacional	40	Pesado
2	Transversal del Sisga, Chocontá – Agua Clara (Macheta, Guateque, Santa María, San Luis de Gaceno)	137 km	Vía Nacional	56	Pesado
Boyacá- Casanare					
3	Transversal de Boyacá, Tunja - Monterrey (Soraca, Boyacá Boyacá, Zetaquirá, Miraflores, Paez)	120 km	Vía Nacional	60	Liviano
4	Transversal de Cusiana, Sogamoso – Aguazul (Sogamoso, Pajarito, Aguazul)	116 km	Vía Nacional	62	Pesado
5	Ruta los Libertadores, Belén-Sacama (Belén, Paz del Río – Socha Sacama, La cabuya)	233 km	Vía Nacional	64	Liviano

Elaboración Propia. Fuente: Instituto Nacional de Vías (Invias).

Los cinco corredores descritos en la tabla anterior se encuentran dentro de la cordillera oriental, donde esta se caracteriza por ser la cordillera más joven, compuesta de manera general por rocas sedimentarias y suelos poco consolidados, su geomorfología destaca por contar con valles profundos y estrechos, haciendo que la estabilidad de sus laderas sea propensa a deslizamientos.

Caracterización Importancia Corredor Vial

Como se menciona anteriormente el corredor vial en estudio hace parte de la transversal de Cusiana, este punto vial habilitado es muy importante para los departamentos de Arauca y Casanare ya que facilita el intercambio comercial entre las diferentes zonas de la Orinoquia, permitiendo la fluida circulación de productos agrícolas, ganaderos e industriales. Permitiendo un mayor acceso a los mercados, mejores precios para los productores un dinamismo generalizado.

Además, la carretera tiene un papel importante en el transporte de hidrocarburos desde los campos petroleros de la Orinoquia hacia los centros de consumo y exportación. Esto Contribuye significativamente a la economía nacional. La vía acorta distancias entre las ciudades y pueblos de la región andina y Orinoquia, mejorando la conectividad y accesibilidad para sus habitantes. Traduciéndose en un mayor flujo de personas, turismo y servicios.

Identificación, Descripción y Análisis de las Características Aledañas de la Transversal de Cusiana.

Dentro de la identificación, descripción y análisis de las características aledañas de la trasversal de cusiana, se pretende mostrar de manera general la interacción de las condiciones de los factores geológicos y geomorfológicos, teniendo en cuenta las aerofotografías tomadas por el IGAC del corredor vial en estudio, de igual forma apoyado con las guías metodológicas que se mencionan a continuación:

- GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTO EN MASA ESCALA 1:25.000, Dirección de Geo amenazas, Grupo de Evaluación de Amenaza por movimiento en Masa, Servicio Geológico Colombiano (SGC), Bogotá D.C. Diciembre, 2017.
- DETERMINACION “A PRIORI” DE LA AMENAZA DE DESLIZAMIENTOS UTILIZANDO INDICADORES MORFODINAMICOS, Dr Sergio Mora Castro, Dr Wilhem in Gunther Vahrson, 1er SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE SENSORES REMOTOS Y SISTEMAS DE INFORMACION GEOGRAFICA (SIG) PARA EL ESTUDIO DE RIESGO NATURALES.
- PROPUESTA METODOLÓGICA SISTEMÁTICA PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS ANALÍTICOS APLICADOS A LA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000, Servicio Geológico Colombiano (SGC), Bogotá D.C. febrero, 2012.
- CLASIFICACION DE MOVIMIENTOS EN MASA Y SU DISTRIBUCION EN TERRENOS GEOLÓGICOS DE COLOMBIA, Servicio Geológico colombiano (SGC), Bogotá D.C. Octubre de 2017.
- Geología del Departamento de Boyacá y Memoria Explicativa, 1999 / 2000, (antiguo INGEOMINAS, actual SGC). En estos documentos se describen los rasgos y las características geológicas a nivel regional del área del Departamento de Boyacá, en el que se ubica el corredor vial en estudio.
- Geología de la Plancha 192 Laguna de Tota y Memoria Explicativa, 1998 / 2001, (antiguo INGEOMINAS, actual SGC). En estos documentos se describen los rasgos y las características geológicas a nivel regional del área de estudio, en el que se ubica del corredor vial en estudio.

- Mapa Geomorfológico aplicado a Movimientos en Masa Plancha 192 Laguna de Tota y memoria temática, convenio SGC-UPTC, 2018. En estos documentos se describen los rasgos y las características geomorfológicas y procesos morfodinámicos a nivel regional del área de estudio, en el que se ubica el tramo del Hito 2, del corredor vial en estudio.
- Unidades Geológicas Superficiales (UGS). Descripción en Campo de Suelos y Rocas para la Elaboración de Mapas de Unidades Geológicas Superficiales escala 1: 25. 000;(Geología para ingeniería, 2017, SGC). En esta metodología se presenta en forma ordenada la descripción en campo de los materiales rocosos (suelos y rocas) para el desarrollo de los temas geológicos en la elaboración de mapas y documentos correspondientes para su aplicación en los trabajos de la Ingeniería Geológicos .
- Mediante las fotografías tomadas por el IGAC en la región, junto con el uso del estereoscopio, se caracterizó (Unidades, geológicas, rasgos geomorfológicos y morfodinámicos) obteniendo información necesaria para la identificación, descripción y análisis de las características aledañas al corredor vial.

Geología

Conforme a la información expuesta en las planchas geológicas 192 (Laguna de tota) y 211 (Tauramena), se identifican las diferentes formaciones geológicas, que debe sortear el trazado existente de la trasversal de Cusiana, para poder sobre pasar y comunicar los municipios de Sogamoso y aguazul en sus 116 km.

De acuerdo con la información de referencia básica expuesta anteriormente. El área donde se ubica el corredor vial en estudio y sus alrededores, afloran rocas sedimentarias de edad cretácica pertenecientes a la unidad de Formación Lutitas de Macanal (Kilm), y rocas Ígneas Intrusivas pertenecientes al Intrusivo de Pajarito (Klip). Igualmente, las rocas se presentan ampliamente cubiertas por depósitos no consolidados de edad cuaternaria, de origen coluvial, en baja proporción de tipo aluvial. En la figura 2, se presenta el esquema geológico regional de ubicación del corredor vial.

Formación Lutitas de Macanal (KILM).

Esta formación geológica se encuentra conformada en su parte inferior por lutitas negras, micáceas, compactas, algo calcáreas; la parte media por areniscas cuarzosas, grises oscuras de grano fino, en estratificación gruesa a maciza, con intercalaciones de lutitas negras ligeramente calcáreas, con venas de calcita y nódulos arenosos, que varían de 5 a 10 cm de diámetro; la parte superior está constituida por lutitas

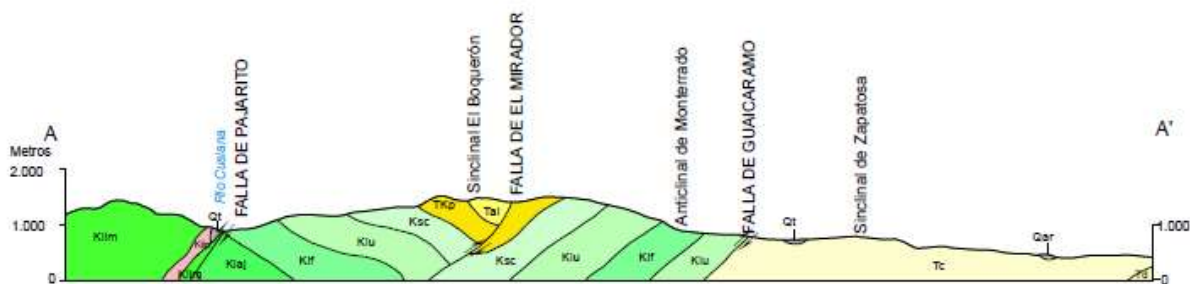
negras, micáceas, con intercalaciones de areniscas grises claras, de grano fino, estratificadas en bancos hasta de 30 cm de espesor.

Estas rocas dentro del área de estudio se presentan en general fracturadas y a nivel de superficie altamente meteorizadas, con el desarrollo de horizontes de meteorización de espesores y características variadas.

De acuerdo con los reconocimientos de campo y la evolución de la información, a nivel local se observa características de fractura, intensidad variada, con el desarrollo de plegamientos de magnitud puntual, con la conformación de laderas con pendiente estructural (buzamiento de las rocas en el mismo sentido de la pendiente de las laderas /taludes, en la parte superior de las laderas), y laderas de contrapendiente (buzamiento de las rocas en sentido contrario a las pendiente de los terrenos/taludes, y con la generación de suelos residuales de espesores variables.

Figura 2.

Corte A-A' Geología de la Plancha 211 Tauramena



Fuente: Servicio Geológico Colombiano, Plancha 211 Tauramena.

Unidad cuerpo intrusivo de pajarito (klip).

Conformado por rocas ígneas intrusivas, de tipo apófisis de lamprofiros y pequeños diques. Esta unidad es de magnitud local, aflorante al oeste y noroeste de la población de Pajarito, el cual se ubica en un sector cercano a la carretera actual Sogamoso-Agua Azul y al final del tramo.

Depósitos cuaternarios.

Dentro del área de la zona de influencia del corredor vial se presentan depósitos cuaternarios de origen Coluvial y aluvial.

Depósitos de Origen Coluvial (Qc).

Este tipo de material se encuentran presente en las laderas tanto superiores como inferiores del corredor vial, de extensión, composición y espesor variables. Este tipo de depósitos son de edad cuaternaria antigua /subreciente y reciente; dentro de este tipo de depósitos se involucran los procesos de inestabilidad recientes, conformantes de los sitios críticos del tramo en estudio.

Depósitos de Origen Aluvial (Qal).

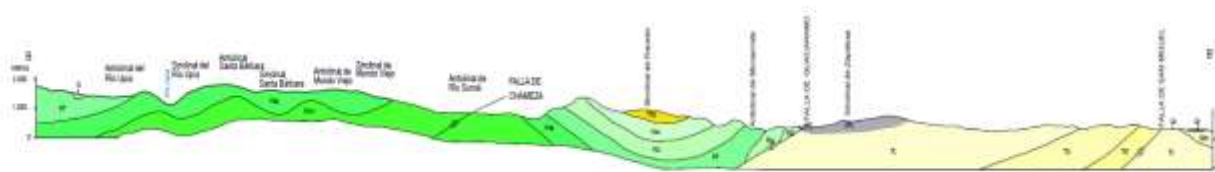
Este tipo de materiales se encuentran conformando de las franjas del cauce y orillas del río Cusiana, y de los afluentes secundarios que atraviesan el corredor vial, de diferente naturaleza (terrazas, conos aluviales, etc.), de composición y espesores variados.

Aspectos Estructurales.

Desde el punto de vista estructural el área del corredor vial en estudio se encuentra influenciada por estructuras de plegamiento y fallamiento (ver figuras 2 y 3). i) Estructuras de plegamiento, de tipo anticlinal (Anticlinal de Río Sunce), y sinclinal (Sinclinal del Desespero), de magnitud regional, con una dirección NE-SW. ii) Entre las estructuras de fallamiento se tiene la Falla Los Yopos (Falla de Pajarito), estructura de magnitud regional y de naturaleza inversa cuyo trazo se ubica por el cauce del río Cusiana, especialmente en la parte media-final del corredor vial en estudio.

Figura 3.

Corte B-B' Geología de la Plancha 211 Tauramena.



Fuente: Servicio Geológico Colombiano, Plancha 211 Tauramena.

Geomorfología

De acuerdo a la información dispuesta en las planchas geomorfológica 192 Laguna de tota y 211 Tauramena junto con sus respectivas memorias explicativas del Servicio Geológico Colombiano, se evidencia las diferentes unidades y subunidades geomorfológicas que se encuentran dentro del trazado de la transversal de Cusiana, transversal que comunica los municipios de Sogamoso y aguazul.

Unidades de Origen Estructural.

Corresponde a las geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra especialmente las asociadas a plegamientos y fallamientos cuya expresión está definida por la litología y la disposición estructural, al plegamiento de las rocas superiores de la corteza terrestre y que aún conservan rasgos reconocibles de las estructuras originales, a pesar de haber sido afectadas en diversos grados por los procesos de denudación. (Padilla Acosta, 2019)

Ladera Estructural de sierra Sinclinal (Sssle).

La unidad geomorfológica que se presenta como una superficie relacionada al flanco de una estructura sinclinal y definida por estratos inclinados a favor de la pendiente del terreno. Predominio de las pendientes muy inclinadas a muy abruptas con una inclinación entre 11° - 30°, seguida por las pendientes muy abruptas y predominio de relieve relativos extremadamente alto. (Padilla Acosta, 2019)

Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal (Ssslc).

Se presenta como una superficie subvertical que se caracteriza por presentar laderas cortas a moderadamente largas hasta de 600m de forma irregular y escalonada, presenta rangos de pendiente que oscilan entre 30° y 40° de abruptas a escapadas, con patrón de drenaje paralelo; es generada por procesos erosivos en los estratos que están dispuestos en sentido contrario a la pendiente del terreno, la actividad tectónica de la unidad está relacionada con estructuras sinclinales. (Padilla Acosta, 2019)

Unidades de Origen Denudacional.

Las unidades geomorfológicas del ambiente denudacional son generadas por procesos de erosión y meteorización moderados a intensos, producidos por los diferentes agentes erosivos (Principalmente el agua), los cuales modelan y reducen la topografía preexistente, generando relictos o remanentes de las unidades originales, la erosión de estas unidades se genera por medio del transporte de materiales nuevas geoformas. (Padilla Acosta, 2019)

Cono de deslizamientos indiferenciado (Ddl)

Corresponden a movimientos de remoción en masa de diferente naturaleza (Traslaciones, deslizamientos rotacionales, flujos, caídas reptaciones, entre otro). Geomorfológicamente esta unidad se caracteriza por su estructura en forma de lóbulos, los cuales tienen un índice de contraste del relieve muy bajo. Se producen sobre suelos cuando los materiales conformantes de una ladera se saturan o sobrecargan reduciendo la resistencia al corte a tal punto de sobrepasar el equilibrio límite de material e iniciado su desplazamiento

cuesta abajo y sobre rocas cuando se tienen planos preferentes que contribuyen al movimiento de un bloque de roca, ejemplo estratificación, diaclasas entre otras, el movimiento se produce sobre una superficie de falla. (Padilla Acosta, 2019)

Subunidades de origen Fluvial.

Son geoformas derivadas de la actividad agradacional y degradacional de los sistemas hídricos y originados por la dinámica de las corrientes, de las cuales se tienen:

Cauce aluvial (Fca).

Esta subunidad o elemento geomorfológico se representa como un canal de forma irregular excavado por erosión de la corriente del río cusiana, dentro de macizos rocosos y sedimentos aluviales preexistentes. Persisten por grandes distancias. Los cauces rectos se restringen a valles en forma de V, generalmente relacionados al control estructural de fallas, presenta pendientes ligeramente planas a inclinadas, con rangos que oscilan entre los 5° y 10°. (Padilla Acosta, 2019)

Terraza aluvial (Fta).

Esta Subunidad / Elemento geomorfológico conforma una pequeña geoforma de sedimentos, la cual fue generada por la acción de transporte y deposición por la dinámica del río cusiana; presenta una morfología en general plana, con un índice de relieve relativo bajo.

Análisis multitemporal partir de las aerofotografías

A partir de las aerofotografías tomadas por parte del IGAC en las décadas de los años 70' y 80' al corredor vial en estudio, junto con el uso del estereoscopio de la entidad, se realiza el análisis y caracterización de las formaciones Geológicas, rasgos geomorfológicos y morfodinámicos, obteniendo de esta manera información histórica completaría a la que se encuentra dispuesta en las planchas del SGC. A continuación, se presenta el listado de las líneas de vuelo y la información de las fotografías seleccionadas para el presente análisis.

Tabla 3.

Relación de la información de las aerofotografías tomadas en los años 70' y 80 por el IGAC.

Año	Vuelo / Orden	Escala	No Fotografía
1978	C-1823	1: 32.000	36-39
1981	C-1994	1: 42.000	240-244

Elaboración Propia. Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC

El área registrada por las aerofotografías abarca el tramo en estudio (PR 80+000 al PR 87+000). Geológicamente el área de la zona de influencia de la vía y alrededores esta conformadas en su totalidad por rocas de la formación lutitas de Macanal (Klim), constituida en la región por una secuencia predominante de lutitas de Macanal (Kilm), constituida en la región por una secuencia predominante de lutitas, con intercalaciones menores de areniscas; estas rocas se observan altamente meteorizadas a juzgar por los procesos erosivos.

Geomorfológicamente se observa subunidades de diferentes ambientes:

- Origen estructural denudacional, con elementos tanto estructurales (Sle) como de contrapendiente (Slc), con abundantes procesos denutativos (erosión de características variadas).
- Origen denudacional (D), con rasgos abundantes movimientos de remoción en masa tanto antiguos como subcreciente/recientes, y por lo tanto, con la generación de varios cuerpos de depósitos coluviales (Dco) principalmente de naturaleza retrogresiva.
- Origen Fluvial (f), con la generación de elementos de tipo terrazas aluviales (Ft) y aluviones resilientes (Fal), presentes principalmente en las orillas y cauce del río cusiana.

Desde el punto de vista morfodinámico se observan elementos de características y localización variada:

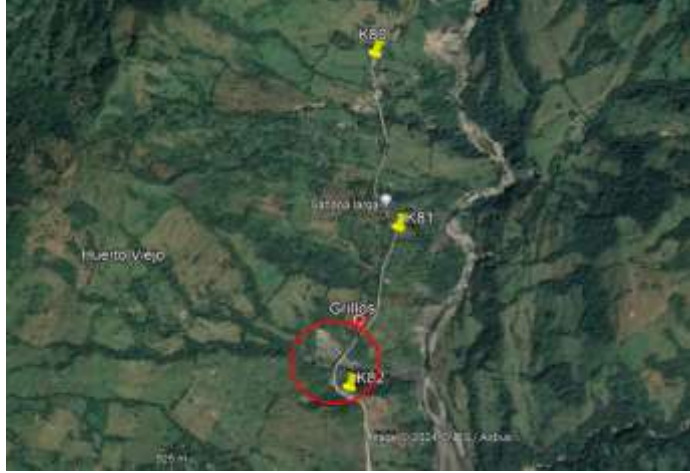
1. Procesos denudativos de tipo erosivo con características variadas (Laminar y surcos, cárcavas en algunos drenajes secundarios con fenómenos de socavación, especialmente en las orillas del río cusiana y en algunas quebradas importantes. Los fenómenos erosivos se presentan fundamentalmente a lo largo de los terrenos de la margen derecha del río cusiana.
2. De tipo denutivo – acumulativo correspondiente a los procesos de remoción en masa, de formas variadas y de diferente naturaleza, desde caída de detritos hasta deslizamientos rotacionales principalmente retrogresivos (a Juzgar por las características de las coronas y/o escarpes). Dentro de esta clase de geoformas se observan depósitos coluviales (Qc), de magnitud variada y de edad

diferente (antiguos, Subcrecientes /recientes), siendo los de menor magnitud presentes en la parte media – Superior de las laderas, y de mayor magnitud presentes posiblemente en las partes medias-inferiores de las mismas, y recientes principalmente en las orillas de algunos drenajes. Estos procesos se observan en general a lo largo de toda la ladera de la margen derecha del río Cusiana.

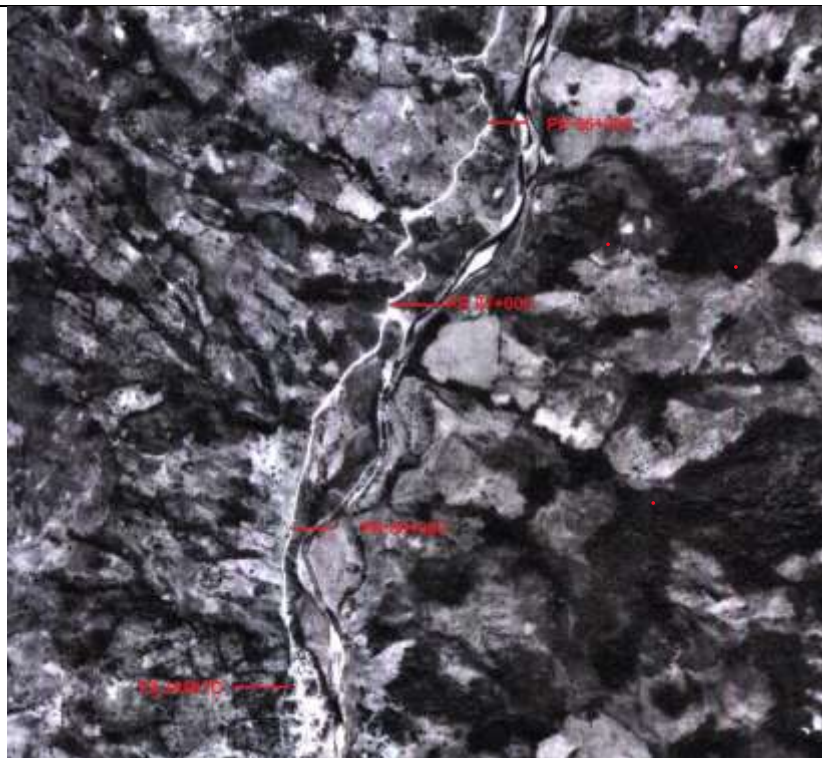
3. Desde el punto de vista morfodinámico subreciente/reciente, se observan procesos de inestabilidad en algunos puntos de la vía especialmente en las orillas de algunos drenajes secundarios, con una mayor densidad y magnitud en los taludes inferiores de la carretera, y especialmente en la orilla derecha del río Cusiana, los cuales por las características de las curvas del drenaje y su intensidad de incisión de la corriente, por su cercanía con la vía, la calidad de los materiales y la pendiente en general alta de las laderas, se puede deducir alguna incidencia de la dinámica de la corriente sobre la estabilidad de los terrenos y por consiguiente de la vía.

Tabla 4.

Análisis multitemporal del tramo vial a partir de aerofotografías de los años 1979 y 2022

	
En el lineamiento inicial se evidencia que cuenta mayor cantidad de curvas aun que los procesos de meteorización en el PR 82 (Q. Chorro Blanco) Son muy similares a los existentes.	En el PR 81, se evidencia que de acuerdo a las constantes lluvias se produce un incremento de esfuerzos, haciendo que en el flanco sur del sinclinal de la quebrada se produzca un proceso de reptación.
	

El lineamiento y los elementos geomorfológicos en las dos épocas que se comparan, conservan el mismo aspecto pero los sinclinales de los cuerpos hídricos se han intensificado, debido a los procesos de meteorización.



La geomorfología y las características del trazado vial en el PR 87 tuvo un cambio significativo, ya que se presentaba flujo de detritos en el talud Superior, Depósitos coluviales de diferente tiempo.

No se evidencian cambios significativos en el lineamiento y la geoforma de la zona analizada en la fotografía sin embargo se evidencia en PR 84+300 (Q. Negra, ha afectado las bases del puente que la cruza.



El Instituto Nacional de vías INVIAS, realiza en el PR 87+050 – 87+100, estabilización de talud, mediante, Zanja de Coronación, Terracedo, Instalación de Tensores con malla eslabonada para contrarrestar el flujo de detritos.

Elaboración Propia. Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, Google Earth Pro.

Zonificación del Punto más Crítico Dentro del Corredor Vial

Una vez realizada la visita de campo al corredor vial que comunica los municipios de Sogamoso - Aguazul, se logró evidenciar, que la zona más propensa y que presenta mayor cantidad de deslizamientos, procesos de remoción en masa de todo el corredor vial, se encuentra en el tramo del PR 80+000 al PR 87+000, debido a sus características geológicas, geomorfológicas especiales.

Dentro del tramo vial escogido, se identifica que es la zona que presenta mayor cantidad de eventos de remoción en masa, afectando los elementos de infraestructura dispuestos por parte de las entidades gubernamentales. A continuación, se describe el estado en que se encuentra a la fecha de cada elemento y la configuración geométrica de la vía y la interacción de los elementos de con la zona.

La vía se encuentra compuesta por una sola calzada con carriles bidireccionales y sirve para la comunicación de los departamentos de Arauca, Casanare y parte de Boyacá con el interior del país

Tabla 5.

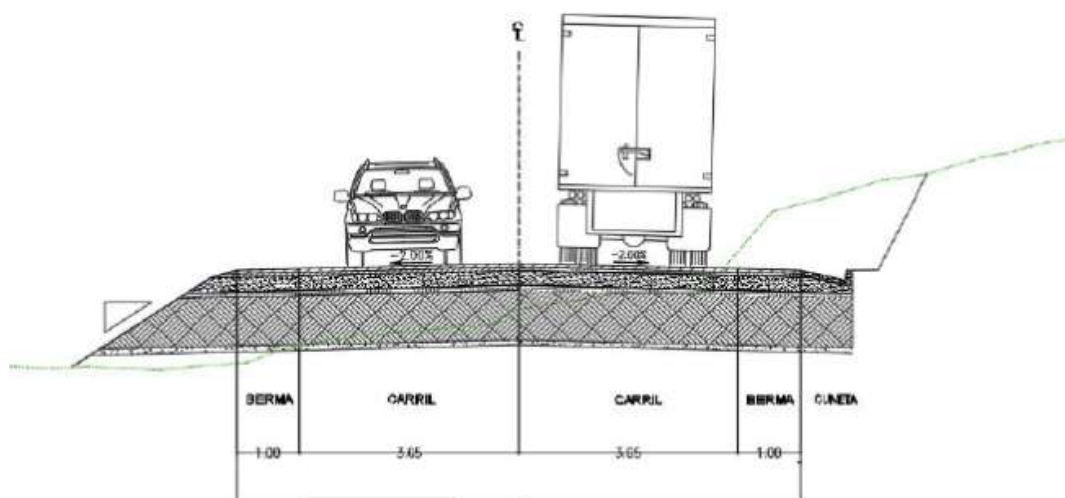
Características geométricas de la transversal de Cusiana.

Tipo de Vía	Primaria
Terreno	Montañoso
Uso	Rural
Velocidad de Diseño Km/h	40
Ancho de la Calzada (m)	7.3
Ancho Bermas (m)	1
% min. adelantamiento	20
Pendiente Max Relativa	0,96%
Pendiente Min Relativa	0,365%
Peralte Max	8%
Bombeo Normal	2,5%
Radio Mínimo (m)	41

Elaboración Propia. Fuente: Instituto Nacional de Vías INVIAS.

Figura 4.

Sección típica de la transversal de Cusiana.



Fuente: Instituto Nacional de Vías INVIAS.

Esta Sección Típica se adapta a la estructura existente (Cunetas, muros, alcantarillas etc) y las obras que se tienen propuestas para cada sitio crítico.

Tabla 6.

Descripción del estado de los elementos de Infraestructura que se encuentran dentro del tramo en estudio.

No	Abscisa	Descripción del Elemento	Fotografía del Elemento
1	79+900 (Ladera denudativa)	En la Abscisa 79+900, se encuentra en la parte superior de la vía una ladera denudativa, permitiendo y propiciando en verano por efectos de la gravedad el arrastre de coluviones y en invierno con el efecto de las lluvias el arrastre de aluviones.	
2	80+000 (Muro de contención en gavión)	En el PR 80+000, se encuentra una estructura de contención en gaviones, con el objetivo de estabilizar la ladera. La flexibilidad del gavión permite adaptarse a los movimientos del terreno y a su vez permite el paso del agua sin colapsar.	

Fotografía No 1.

Fotografía No 2.

3 **81+250**
 (Puente los
 grillos)

Puente los grillos se le acusa su nombre debido al cause que sobre pasa, este contaba con una longitud de 260m, constituido por una viga cajón en concreto reforzado y postensado, modalidad voladizo sucesivo.

Este puente hacia parte de las obras ejecutada dentro del contrato No 807 de 2009, suscrito entre el Instituto Nacional de Vías INVIAS y el Consorcio CC-MP-HV, cuyo objeto es: Estudios y Diseños, Gestión Social, Predial, Ambiental y Mejoramiento del proyecto transversal de Cusiana

En la zona superior del puente, se evidencia un proceso de reptación, debido a cambios estacionales de lluvia y temperatura, las lutitas presentan, hinchamiento y contracción, provocando el empuje y desplazamiento de la masa.

De acuerdo a la anterior presunción, se establece que la base del costado norte, presento un desplazamiento horizontal, haciendo que se generara la cortante y este fallara, al contar con un desplazamiento considerable.

El puente de Chorro blanco asume su nombre debido a la quebrada que cruza, la cual tiene el mismo nombre. Este puente cuenta con una longitud de 300m, constituido por una viga cajón en concreto reforzado y postensado, modalidad voladizo sucesivo. Así mismo hace parte de los 14 puentes que se ejecutaron dentro del contrato 807 de 2009.



Fotografía No 3.



Fotografía No 4.



Fotografía No 5.



Fotografía No 6.

4 **81+750**
(Puente
Chorro
Blanco)

De acuerdo al seguimiento multitemporal de la zona superior del puente, se evidencia que desde hace varias décadas se ha presentado en la parte superior norte de la ladera un incremento del área denudativa. Propiciando en verano por efectos de la gravedad el arrastre de coluviones y en invierno con el efecto de las lluvias el arrastre de aluviones.



Fotografía No 7.

En la parte inferior del puente se evidencia el dado que une los caisson con el pilar del puente, presentan socavación dejando expuesta la estructura, de esta manera disminuyendo la resistencia.



Fotografía No 8.

El puente Berbeno contaba con una longitud de 55m. En sistema estructural en losa y viga de una sola luz. Este se encontraba dentro de la propuesta de obras de adecuación del contrato 807 de 2009, ya que desde hace varios años colapso.



Fotografía No 8.

5 **82+650**
(Puente
Berbeno)

A través del tiempo se ha implementado la construcción de diferentes estructuras que disipen la energía del flujo del cauce. Los azudes han sido una propuesta para disminuir la energía, sin embargo, como se evidencia en la imagen estos han presentado retención de rocas.



Fotografía No 9.

Para dar continuidad con el flujo vehicular se implementó por parte del Instituto Nacional de Vías INVIAS, la construcción de un boxculvert, para remplazar el puente de Berbeno. Como se evidencia en la fotografía, la parte interior del boxculvert está presentando desgaste y fatiga de la estructura.



Fotografía No 10.

6 **83+650**
(Ladera
denudativa)

Conforme al registro multitemporal de la zona continua al PR 83+650, se evidencia que se ha incrementado el área denudativa del lomo de la ladera, al igual que la sección del escarpe, se observa que en la parte superior de la vía se ha deformado la ladera incrementando la pendiente propiciando de esta manera el flujo de lutitas meteorizadas, suelos residuales que obstruyen y afectan la banca de la vía, afectando de esta manera el flujo vehicular.



Fotografía No 11.



Fotografía No 12.

7

84+300
(Puente
Quebrada
Negra)

El puente quebrado negra recibe el nombre de acuerdo a la quebrada que sobre pasa, el puente cuenta con una longitud de 21,5m. En sistema estructural en losa y viga de una sola luz. De acuerdo a su vetustez se presume que cuenta con más de 50 años de construido. Este se encuentra conformado por cuatro vigas en concreto reforzado de un metro y tablero en concreto.

El puente presenta daños en las juntas de expansión y en las barandas de concreto, el tablero en la parte inferior presenta agrietamientos y fisuras. En los estribos se presume que no cuenta con concreto reforzado como se evidencia en la imagen.



Fotografía No 13.



Fotografía No 14.

Para garantizar el flujo del tráfico, las entidades gubernamentales dispusieron de la instalación de un puente militar, sobre el puente quebrada negra.



Fotografía No 15.

8 **85+100**
(Ladera en
proceso de
Reptación)

La ladera de la parte superior del corredor vial se encuentra compuesta por un macizo rocoso de composición de lutitas meteorizadas estructural Sle, se encuentra influenciado por un proceso de reptación, el cual afecta el diseño y trazado de la vía, afectando la velocidad de diseño y la posible pérdida de la banca

Se evidencia en la siguiente imagen el plan de manejo de tráfico dispuesto por parte del contratista del Instituto Nacional de Vías INVIAS, para el aislamiento del corredor vial con el desprendimiento de rocas de la ladera.



Fotografía No 16.



Fotografía No 17.

El puente la Orquídea fue ejecutado mediante el contrato No 807 de 2009 y puesto en servicio a finales del 2011. La totalidad de las obras ejecutadas dentro del contrato No 807 de 2009, fueron recibidas de manera definitiva el 30 de mayo de 2015, dicho contrato fue liquidado el 27 octubre 2017, el colapso del



Fotografía No 18.

9

86+500
(Puente
Orquídea)

puente las Orquídeas fue el 29 de octubre de 2019.

Conforme al Informe auditoria de la Contraloría General de la Republica referente al colapso del puente la orquídea menciona que: La selección de un sistema hiperestático no es apropiada cuando se prevén movimientos del terreno. El hecho que la luz de contrapeso sea corta con respecto a la luz central hace más sensible la estructura a posibles desplazamientos del terreno. Cualquier desplazamiento del extremo del puente incrementa los momentos positivos en el centro de la luz. El hecho que el puente sea curvo incrementa la sensibilidad de la estructura. 5. En la Etapa de Estudios & Diseños se debió determinar la posibilidad de reactivación de procesos de remoción en masa máximo el ambiente geológico, geotécnico, sismogénico y pluviométrico de la zona del proyecto para garantizar que la infraestructura del puente estuviera en la capacidad de soportar empujes de tierra por la generación de cuñas de falla por lo cual resulta necesario revisar si en los estudios y diseños de detalle se tuvo en cuenta la particularidad de la estabilidad global de los estribos para contemplar no solo empujes inerciales sino más bien complementarios en función de empujes de tierra por inestabilidad de laderas. (...)



Fotografía No 19.



Fotografía No 20.



Fotografía No 21.

10 **87+000**
 (Talud con
 Terraceo,
 apuntalamiento)

El proceso de remoción en masa de la ladera del sector San Francisco en el PR 87+000 de la transversal de cusiana, se encuentra influenciado por la socavación del río Cusiana en la pata de la ladera lo que ha causado que el talud se encuentre continuamente presentando desprendimientos de estratos hacia el río causando pérdida de material donde se localiza implantada la vía. En la parte superior de la ladera se observó un proceso de remoción en masa de la unidad de lutita meteorizada que alcanza una altura importante hasta el escarpe principal. El contratista para la estabilización de la ladera propuso el terraceo con anclajes con tendones de acero, anclado a vigas perimetrales interconectados y en la pata de la ladera un tablestacado para la siembra de un sistema arbóreo.



Fotografía No 22.



Fotografía No 23.



Fotografía No 24.

Geología

En la caracterización del área estudio, se realizó un reconocimiento de campo a lo largo del alineamiento, donde se evidencio las formaciones geológicas generales, y las características de los materiales presentes (Rocas y Suelos) en dichos sitios. Para el análisis y definición de las unidades geología para la ingeniería (UGI), Se siguieron los lineamientos y criterios sugeridos por el Servicio Geológico Colombiano (Metodología Sistemática para la generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos SGC, 2012), teniendo en cuenta los criterios para la definición de los componentes de rocas y suelos, se determinó como parámetros, la matriz rocosa (Composición, grado de meteorización, dureza, disposición estructural, perfiles de meteorización).

En la siguiente tabla se presenta la interpretación y descripción de las formaciones geológicas con las subunidades geomorfológicas, teniendo en cuenta la relación entre las planchas Geológicas y Geomorfológicas del Servicio Geológico Colombiano con lo evidenciado en la vista de campo, describiéndolo de acuerdo abscisado del tramo en estudio.

Tabla 7.

Interpretación y descripción de formaciones Geológicas.

No	Abscisa	Formación Geológica	Subunidad/ Elemento Geomorfológico	Fotografía
1	PR 80 + 000, margen derecha rio Cusiana.	Deposito Coluvial (Qc). Con generación de flujo de detritos, con ventanas de rocas de la formación Lutitas de Macanal (Kilm)	Ladera denudativa / de contrapendiente con pendiente escarpada, cubierta con deposito coluvial (Qc), con generación de flujo de detritos, con ventanas de rocas de la Formación Lutita de Macanal (Kilm)	 Fotografía No 25.
2	PR 80 + 500, margen derecha rio Cusiana	Afloramiento de rocas de la formación lutitas de Macanal (Kilm)	Ladera empinada con cubierta en terracetes escalonados se forman cuando las partículas saturadas del suelo se expanden y luego se contraen a medida que se secan, estos se desarrollan en flancos sinclinales.	 Fotografía No 26.
3	PR 81+150, quebrada a los grillos	Depósito coluvial (Qc), con generación de movimientos en masa complejos	Ladera denutiva con pendiente alta, cubierta con deposito coluvial (Qc), con generación de movimientos en masa complejos.	 Fotografía No 27.
4		Deposito Coluvial (Qc), generación de	Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi),	

	PR 81+400 Quebrada NN	movimientos en masa complejos (Qcx).	Ladera escarpada con movimiento de masa tipo reptacional esta evidencia, ya que el tipo de desplazamiento del terreno va reptando de manera serpenteante sobre la superficie terrestre.	
			Cono de	
5	PR 81+800 Quebrada Chorro Blanco	Deposito Coluvial (Qc), generación de movimientos en masa complejos (Qcx).	deslizamiento indiferenciado (Ddi), Ladera escarpada denutiva con pendiente alta, cubierta con deposito coluvial (Qc).	
				Fotografía No 29.
6	PR 82+050	Deposito Coluvial (Qc), generación de movimientos en masa complejos (Qcx).	Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi), Ladera escarpada denutiva con pendiente alta, cubierta con deposito coluvial (Qc).	
				Fotografía No 30.
7	PR 82+800 El bérbero	Cono de deslizamiento indiferenciado (Ddi) generación de movimientos en masa complejos	Ladera denutiva con pendiente, alta, Deslizamiento complejo (Qcx), depósitos o Geoformas coluviales de diferentes tiempos; (Sr/Rdm/Kilm), suelo residual/roca degrada y meteorizada de la forma lutitas.	
				Fotografía No 31.
8	PR 83+400 Banca de la vía	Deposito Coluvial (Qc), Con generación de asentamiento en la banca y efectos en el talud inferior.	Ladera denudativa, con presencia de depósito coluvial (Qc), con generación de asentamiento en la banca y efectos en el talud inferior.	

		y talud interior				Fotografía No 32.
9	PR 83+550 Toboganes	Unidad lutitas de Macanal (Kilm), con desarrollo de suelo residual (Sr/Rdm), y generación de flujo de detritos.	Ladera de contrapendiente, con movimiento de masa tipo reptacional, macizo rocoso con pendiente alta, con desarrollo de suelo residual y generación de flujo de detritos.			Fotografía No 33.
10	PR 83+850. Ladera/ Talud superior	Deposito Coluvial (Qc), con generación de flujo de detritos.	Ladera estructural con pendiente alta, con desarrollo de suelo residual y generación de flujo de detritos.			Fotografía No 34.
11	PR 84+300 Escuela Quebrada Negra	Deposito Coluvial (Qc), con generación de flujo de detritos.	Ladera estructural (Cuyo Buzamiento de los estratos es la misma dirección de la pendiente del Talud/Ladera), con macizo rocoso de lutitas laminadas.			Fotografía No 35.
12	PR 85+100 Tierra Negra	Lutitas, altamente meteorizada, de la formación Lutitas de Macanal (Kilm), con generación de flujos de detritos.	Ladera estructural Sle, con macizo rocoso de composición lutitas meteorizadas, con la generación de flujos de detritos en la ladera/talud superior.			Fotografía No 36.

13	PR 85+600 Ladera derecha de la Vía.	Depósito Coluvial (Qc), con la generación de Flujo de detritos en las márgenes de la Quebrada.	Ladera denudativa de pendiente alta conformada por deposito coluvial, con ventanas de rocas de tipo Lutitas,	
				Fotografía No 37.
14	PR86+5 00 Quebrada el Soque	Suelo residual (Sr), originados de rocas de la formación Lutitas de Macanal (Kilm), con la generación de flujo de detritos.	Ladera estructural de pendiente alta, conformada por suelo residual y Lutitas de Macanal (Kilm), con la generación de flujos de detritos en la ladera superior.	
				Fotografía No 38.
15	PR86+7 00Quebrada el Soque	Suelo residual (Sr), originados de rocas de la formación Lutitas de Macanal (Kilm), con la generación de flujo de detritos.	Ladera estructural de pendiente alta, conformada por suelo residual y Lutitas de Macanal (Kilm), con la generación de flujos de detritos en la ladera superior.	
				Fotografía No 39.
16	PR 87+100	Deposito coluvial (Qc), sobre talud/ladera Superior con la generación de deslizamiento Traslacional	Ladera denudativa de pendiente alta conformada por deposito coluvial, con la generación de deslizamiento traslacional en el talud/ladera superior, con presencia de procesos de erosión.	
				Fotografía No 40.

Elaboración Propia. Fuente: Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, Google Earth Pro.

Grado de Meteorización.

El grado de Meteorización influye en la formación de los suelos residuales, estabilidad de laderas y en acción de los procesos erosivos y gravitacionales. Igualmente, el grado de meteorización de las rocas influye en forma importante sobre las propiedades, fisicomecánicas de las mismas tales como: densidad, esfuerzo

a la compresión encofinada, esfuerzo a la tensión encofinada, porosidad, deformabilidad y consistencia, entre otras.

En la caracterización de los materiales geológicos es necesario usar una descripción de la secuencia de horizontes del perfil de meteorización, la cual se puede utilizar con fines descriptivos.

Suelos.

los materiales de suelos se clasifican en, suelos residuales (sr), transportados divididos en las clases coluviales (stco) y aluviales (terrazas, sttal y de aluviales recientes, stal).

Suelos Residuales de Lutitas de Macanal (Srlm).

Suelo derivado de la meteorización de rocas de la formación Lutitas de Macanal (Kilm), (grado IV a VI de meteorización de Dearman 1974-1991), de colores gris, amarillo, naranja, rojizo y gris oscuro. Presenta textura limo-arcillosa, compacidad suelta, plasticidad baja a media, permeabilidad cualitativa a media, en general con humedad alta. Con espesores visibles de aproximadamente 0.5m a 1.0m en promedio; se presentan en los afloramientos rocosos muy limitados entre el PR 77+000 a PR 88+500, y con espesores mayores hasta de 2.0m, reportados por la información de las perforaciones especialmente en el sector de los puentes de Orquídeas 1 y 2 (PR 86+100- 86+350). (Padilla Acosta, 2019)

Suelos Transportados (St).

Los suelos transportados se clasifican en coluviones y aluviales (terrazas y aluviones recientes).

Suelos Transportados de Depósitos Coluviales (Stdc).

Materiales soportados y clasto soportados, de sueltos a medianamente compactos, producto de movimientos en masa activos y/o inactivos, se incluye material transportado por acción de la gravedad y de lavado por escorrentía superficial, acumulados en las partes media-baja de las laderas, especialmente en los cambios fuertes de pendiente.

De composición heterogénea, constituidos por cantos y bloques de lutitas, areniscas y limolitas, de tamaños y formas variadas, con una matriz de composición variada, arcilla, limo, de grava fina, de consistencia media en estado seco y baja en estado húmedo, poco consolidados. Presentan espesores muy variables los cuales oscilan entre los 1.6m y los 10.0m, con espesores mayores (15.0-16.0m) se observan en el sector de

los puentes, los Grillos (PR81+200), La Orquídea 1 (PR86+100), y de hasta 22.5m, en el sitio de Orquidea 2, (PR86+350). (Padilla Acosta, 2019)

Estos depósitos se encuentran ampliamente distribuidos en toda el área de las laderas de la margen derecha del río Cusiana donde se ubica el corredor en estudio. En las fotografías de la tabla No 6, se ilustran las características de los materiales de depósitos coluviales presentes dentro del corredor vial en estudio. Igualmente, en estas fotografías se señalan o muestran los rasgos o características sobresalientes como escarpes, contactos entre cuerpos o geoformas, deslizamientos o procesos recientes, entre otros.

Tabla 8.

Interpretación y descripción de los suelos.



Fotografía 41. SubTramo PR79+800 - PR80+150 (Parte Superior de la Vía): (Sr/Rdm/Kilm), suelo residual/roca degradada y meteorizada de rocas de formación Lutitas de Macanal, Se evidencia el terraceo que se presenta por un proceso de reptación.



Fotografía 42. SubTramo PR79+800 - PR80+150 (Parte Inferior de La vía): (Qcx), depósitos coluviales de diferentes tiempos. Se evidencia deslizamiento tipo Caída.



Fotografía 43. SubTramo PR81+100 - PR81+300 (Parte Superior de la Vía): Se evidencia deslizamiento y desprendimiento del suelo (Lutitas Negras grisáceas), Se evidencia proceso de reptación.



Fotografía 44. SubTramo PR81+100 - PR81+300 (Parte Superior de la Vía): Se evidencia proceso de reptación, debido a cambios estacionales de lluvia y temperatura, las lutitas presentan, hinchamiento y contracción, provocando el empuje y desplazamiento de la masa.



Fotografía 45. Sub Tramo PR81+100 - PR81+300 (Parte Inferior de la Vía): Se evidencia muro de contención, conforme al proceso de reptación se observa que tuvo un desplazamiento considerable al igual que la base occidental del puente los grillos; generando el Colapso mismo.



Fotografía 47. SubTramo PR82+300 - PR82+800, (Qcx), depósitos coluviales de diferentes tiempos, Se evidencia socavación y ensanchamiento del canal natural del cuerpo hídrico; (Sr/Rdm/Kilm), suelo residual/ roca degrada y meteorizada de la formación lutitas negras con esporádicas intercalaciones de calizas areniscas.



Fotografía 49. SubTramo PR84+200 - PR84+500, (Qcx), depósitos coluviales de diferentes tiempos, Se evidencia el arrastre y meteorización de las lutitas negras.



Fotografía 46. SubTramo PR81+700 - PR82+100, (Qcx), Se evidencia deslizamiento, deposito coluvial de diferentes tiempos; en las fotografías tomadas en el año 1979 presentaba una situación similar; (Sr/Rdm/Kilm), Suelo residual/ roca degradada y meteorizada de la formación (Kilm).



Fotografía 48. SubTramo PR82+300 - PR82+800, (Qcx), depósitos o geoformas coluviales de diferentes tiempos, Se evidencia socavación y ensanchamiento del canal natural del cuerpo hídrico; (Sr/Rdm/Kilm), suelo residual/ roca degrada y meteorizada de la formación lutitas negras con esporádicas intercalaciones de calizas areniscas.



Fotografía 50. SubTramo PR85+000 - PR85+300, Se evidencia proceso de reptación, debido a cambios estacionales de lluvia y temperatura, las lutitas presentan, hinchamiento y contracción, provocando el empuje y desplazamiento de tierras.



Fotografía 51. SubTramo PR86+300 - PR86+600, Qcx), depósitos o geoformas coluviales de diferentes tiempos, Se evidencia socavación y ensanchamiento del canal natural del cuerpo hídrico.



Fotografía 52. SubTramo PR86+900 - PR87+200, Qcx), Se evidencia deslizamiento, deposito coluvial de diferentes tiempos. Contratista para mitigar realiza zanja de coronación, talud con terracedo, instalación de tensores, con malla galvanizada y geomembrana.

Fuente. Elaboración Propia.

Del análisis anterior, se observa que en su gran mayoría los suelos mostrados se encuentran conformados por depósitos coluviales antiguos de magnitud importante, los cuales se encuentran conformados por suelos residuales, roca degradada y meteorizada, que a su vez la formación geológica lutitas de macanal, se encuentra conformada por lutitas negras con esporádicas intercalaciones de calizas, areniscas y bolsones de Yeso.

Suelos de Depósitos de aluviones recientes (Stal).

Depósito aluvial, clasto soportado, con tamaño de grano desde arenas hasta bloques; los clastos son subredondeados a redondeados, y elongados, y moderadamente meteorizados de naturaleza variada. La matriz es de textura arenosa y limosa, de espesores variados.

Estos materiales conforman el cauce y orillas del río Cusiana. Por las características que muestran las curvas sinuosas del cauce, su intensa incisión y socavación de la corriente especialmente en su orilla derecha, pueden indicar alguna influencia sobre la estabilidad de las laderas de la margen derecha del río y por consiguiente por sus efectos sobre la vía en mención.

Geomorfología

En el análisis del componente Geomorfológico, el procedimiento de estudio se fundamenta en la Propuesta Metodológica Sistemática Para la Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa, del Servicio Geológico Colombiano (SGC); Se establece a nivel de Subunidad (escala 10.000 a 1:25000). El elemento o componente Geomorfológicos

determina los rasgos del relieve (Escarpes naturales o antrópicos) relieves internos de laderas o flancos, crestas formas de valle definidos, sitios Puntales y determinados por la morfometría detallada, del terreno en una subunidad geomorfológica. Igualmente, está definida por relieves asociados con una característica litológica.

Entre las características de utilidad del componente geomorfológico, se tiene en cuenta las formas de los terrenos por su génesis y parámetros morfométricos de los cuales se consideran por su importancia ingenieril, la forma de inclinación de la pendiente de dichos terrenos.

La inclinación de la pendiente, parámetro fundamental en los análisis de estabilidad de los terrenos, corresponde al ángulo de inclinación que forma una ladera o terreno respecto a un plano horizontal imaginario.

Tabla 9.

Rangos de Inclinación de la ladera.

PARÁMETRO	UNIDAD CARTOGRAFICA DE PARÁMETRO	INCLINACIÓN (GRADOS)
INCLINACION DE LA PENDIENTE	Plana	Menor de 1
	Suave	1-5
	Moderada	5-10
	Inclinada	10-15
	Abrupta	15-30
	Escarpada	30-45
	Muy Escarpada	>45

Elaboración Propia. Fuente: Servicio Geológico Colombiano.

Definición y Caracterización de las Subunidades y Elementos Geomorfológicos para Ingeniería (UG).

De acuerdo con las características geológicas, morfológicas, los resultados de la fotointerpretación, la información obtenida en los reconocimientos de campo, y los análisis correspondientes, en el corredor de la vía en estudio se presentan subunidades y elementos o geoformas de ambiente: i) estructural-denudativo, cuyas geoformas corresponden a laderas estructurales /de contrapendiente; ii) de origen denudativo, cuyas subunidades/elementos son de tipo coluvial, y de ambiente fluvial, cuyas geoformas son la terraza aluvial, y los aluviones recientes o cauces de drenajes activos.

Subunidades de Origen Estructural- Denudacional (SD).

Corresponden a geoformas originadas por la influencia de la actividad tectónica sobre los macizos rocosos, los cuales han sufrido procesos denudacionales, generado expresiones escarpadas, así por la disposición de sus capas con respecto a la pendiente del terreno, y desarrollando elementos de tipo laderas estructurales y de contrapendiente. Dentro del corredor en estudio, entre las geoformas pertenecientes a este tipo de subunidades se diferencian:

Las Laderas Estructurales (Sle),

subunidades/elementos en los que el buzamiento de estratos rocosos presenta su dirección en el mismo sentido de la pendiente topográfica de los terrenos, son en general de forma alargada. Corresponden a los macizos rocosos de la Formación Lutitas de Macanal (Kilm), observables principalmente en la parte alta del área de estudio y en sectores localizados de la parte media-baja, con una pendiente de abrupta a escarpada (15° - 45°).

Las Laderas de Contrapendiente (Slc),

son elementos en los que el buzamiento de estratos rocosos presenta su dirección en el sentido contrario de la pendiente topográfica de los terrenos, en general de formas cortas; observables principalmente en la parte baja del área de estudio, con una pendiente de moderada a abrupta (5° - 30°).

Subunidades de Origen denudacional (D).

Corresponden a geoformas relacionadas con los procesos denudacionales de moderados a intensos de meteorización, erosión, transporte y de origen gravitacional que remodelan y dejan remanentes de unidades preexistentes e igualmente se crean nuevas unidades por acumulación de sedimentos. Dentro de estas se presentan los depósitos de origen coluvial.

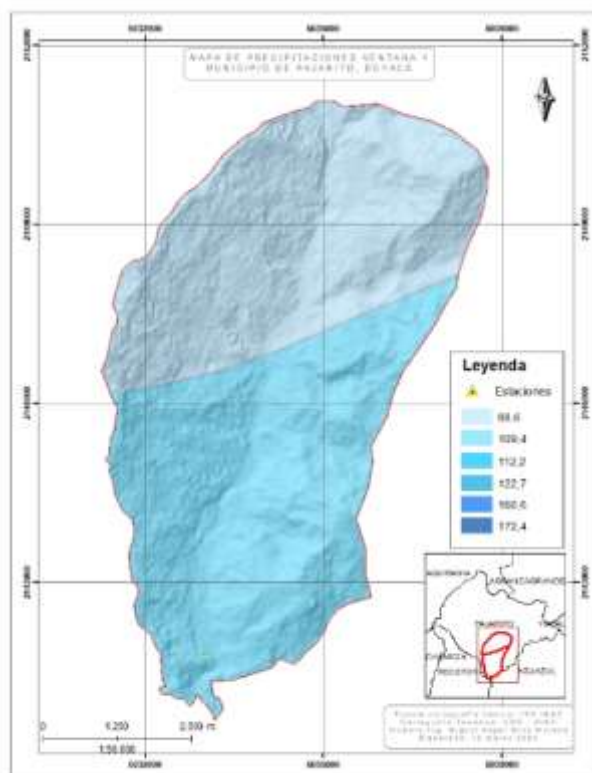
Depósitos Coluviales (Dco).

Geoforma que corresponde a una zona de acumulación de material (suelo y /o roca) que fue transportado por la acción de la gravedad, producto de procesos de remoción en masa antiguos/subrecientes/recientes, generados o reactivados, lo cual se evidencia por la escasa o ausencia de vegetación, con escarpes erosivos y hundimientos. Presentan laderas variables de forma variada a cónica, desde cortas (50 m a 250m) a largas (500 m a 1000 m), con inclinaciones moderadas (5° a 20°), abruptas (20° a 45°) y escarpadas ($> 45^{\circ}$). En el área de estudio los depósitos coluviales se encuentran ampliamente distribuidos a lo largo de las laderas de la margen derecha del río Cusiana, donde se encuentra ubicado el corredor vial en estudio.

De acuerdo con el registro diario, que se encuentra dispuesto en el base de datos del IDEAM. se realizó el análisis de los datos máximos diarios, de los últimos treinta y dos años, distribuidos con información ponderada de dieciséis años cada uno, el primer mapa recopila información de 1990 – 2006, el segundo mapa recopila información de 2007 – 2023.

Figura 5.

Mapa Registro pluviométrico máximo en 24h (1990-2006)

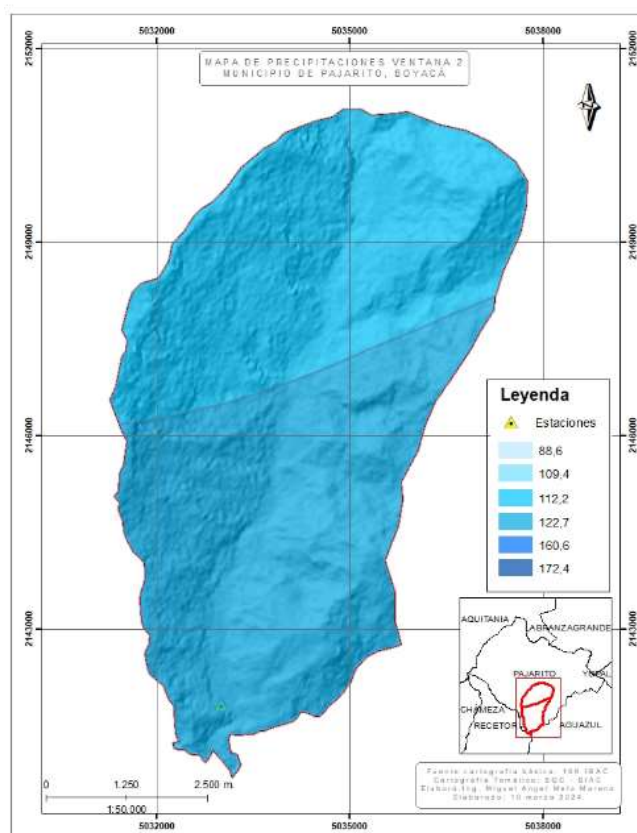


Fuente. Elaboración Propia, ArcGIS.

Se obtiene como resultado para la línea de tiempo (1990-2006), una precipitación máxima en veinte cuatro horas de 88,6 mm/24h en la estación superior denominada Corinto y una precipitación máxima en veinte cuatro horas de 109 mm/24h en la estación inferior denominada pajarito.

Figura 6.

Mapa Registro pluviométrico máximo en 24h (2007-2023).



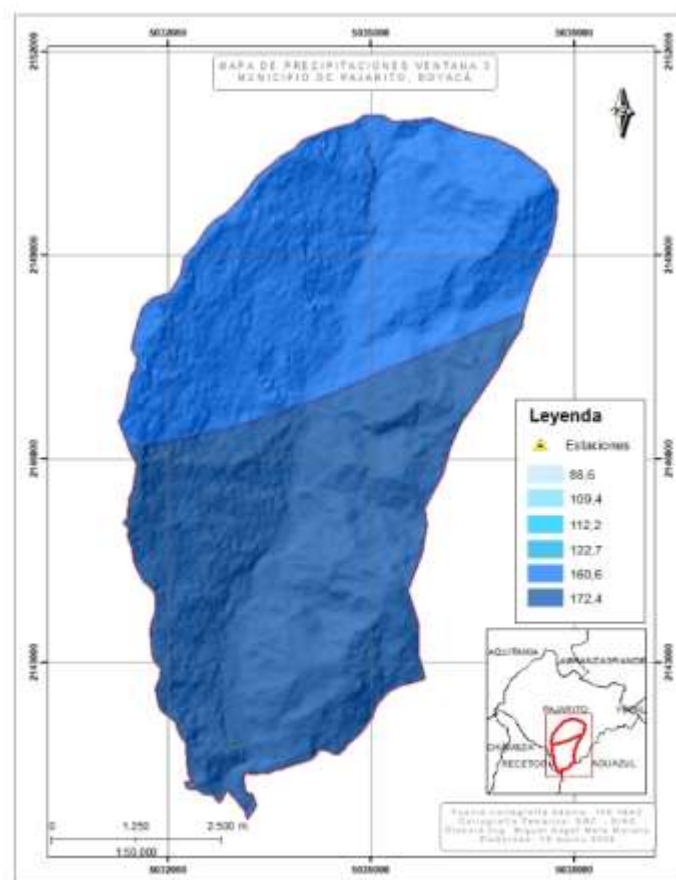
Fuente. Elaboración Propia, ArcGIS

Se obtiene como resultado para la línea de tiempo (2007-2023), en la estación corinto una precipitación máxima en veinte cuatro horas de 112,2 mm/24h. En la estación inferior denominada pajarito una precipitación de 122,7 mm/24h.

Con la información anteriormente dispuesta, se realiza la proyección pluviométrica 2050-2060, mediante la metodología de continuidad y distribución Weibull & Gumbel ya que esta se ajusta a los valores máximos de precipitación, y así realizar la modelación en el Sistemas de Información geográfica SIG (ArcGis).

Figura 7.

Mapa Proyección Pluviométrica máxima en 24 h (2050-2060).



Fuente: Elaboración Propia, ArcGIS.

Se obtiene como resultado para la línea de tiempo (2050-2060), en la estación corinto una precipitación máxima en veinte cuatro horas de 160,6 mm/24h. En la estación inferior denominada pajarito una precipitación de 172,4 mm/24h.

Como se evidencia en la proyección cartográfica de los tres mapas, a través del tiempo la intensidad pluviométrica Aumenta.

Temperatura

La temperatura no se encuentra descrita como un factor u o amenaza dentro de las Guías metodológicas para la zonificación de amenaza por movimientos del (SGC), sin embargo, esta si tiene un impacto significativo en el cambio volumétrico del suelo aumentando la probabilidad a que se presenten deslizamientos y movimientos de diferentes maneras:

Cambios de Temperatura.

El aumento de la temperatura ocasiona cambio en los patrones de precipitación.

Elevación de Temperatura.

La elevación de la temperatura propicia que el contenido de agua en las capas superiores del suelo disminuya, facilitando que la evapotranspiración aumente, generando un cambio volumétrico rápido de las capas exteriores del suelo.

Cambios Estacionales.

Afecta el ciclo del crecimiento de las plantas, influyendo en la cobertura vegetal y la profundidad de las raíces, impactando en la estabilidad del terreno.

Para el respectivo análisis se identificaron las estaciones climáticas que se encuentran cerca al corredor vial en estudio, para el caso se encontraron las estaciones de Corinto (Municipio de Pajarito), Olarte (Municipio de Aquitania) y Aguazul (Municipio de Aguazul): con el código y nombre se descargó en la plataforma de Consulta y descarga de Datos Hidrometereológicos del IDEAM la información relacionada a la temperatura, a continuación, se evidencia la información de las dos estaciones:

Tabla 11.

Estaciones Climáticas aferentes al área de Estudio.

Estación No 1					
Nombre	Corinto	Entidad	Ideam	Latitud	5,407
Código	35195050	Departamento	Boyacá	Longitud	-72,717
Categoría	Climática Ordinaria	Municipio	Pajarito	Altitud msnm	1550
Estación No 2					
Nombre	Olarte	Entidad	Ideam	Latitud	5,480
Código	35095040	Departamento	Boyacá	Longitud	-72,930
Categoría	Climática Principal	Municipio	Aquitania	Altitud msnm	2670
Estación No 3					
Nombre	Aguazul	Entidad	Ideam	Latitud	5,180
Código	35195030	Departamento	Casanare	Longitud	-72,250

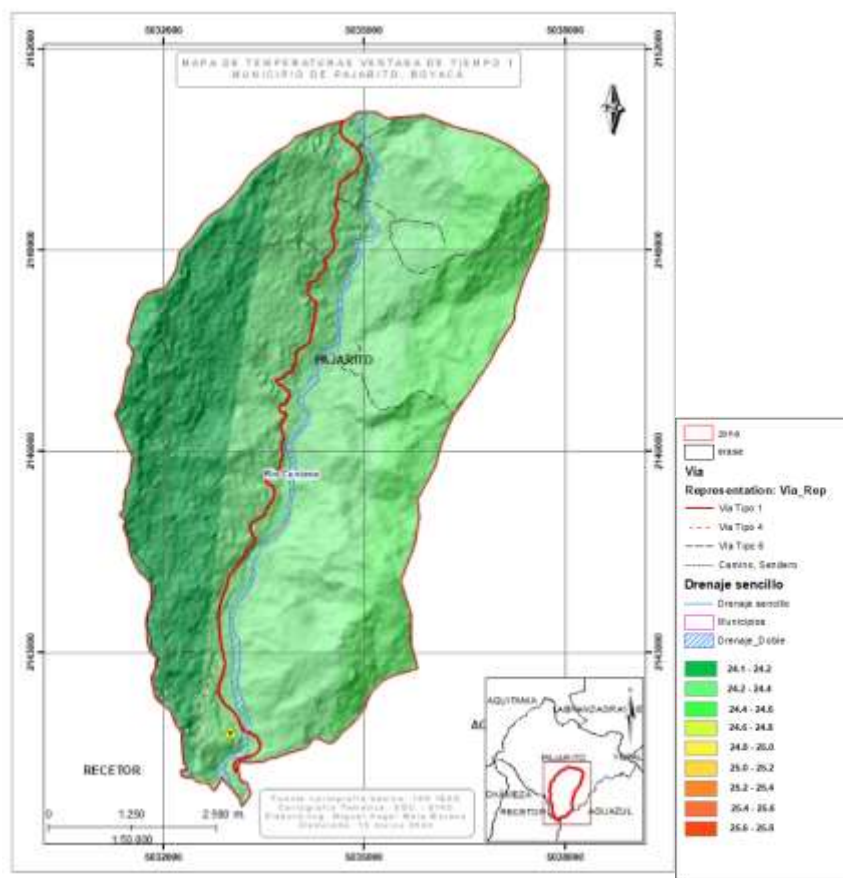
Categoría	Climática Ordinaria	Municipio	Aguazul	Altitud msnm	380
------------------	------------------------	------------------	---------	---------------------	-----

Elaboración Propia. Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios Ambientales (IDEAM)

De acuerdo con el registro dispuestos en el base de datos del IDEAM se realizó la verificación de los datos máximos anuales, y así modelar los mapas de temperatura de los últimos treinta y dos años, distribuidos con información ponderada de dieciséis años cada uno, el primer mapa recopila información de 1990 – 2006, el segundo mapa recopila información de 2007 – 2023.

Figura 8.

Mapa Registro de Temperatura (1990-2006).

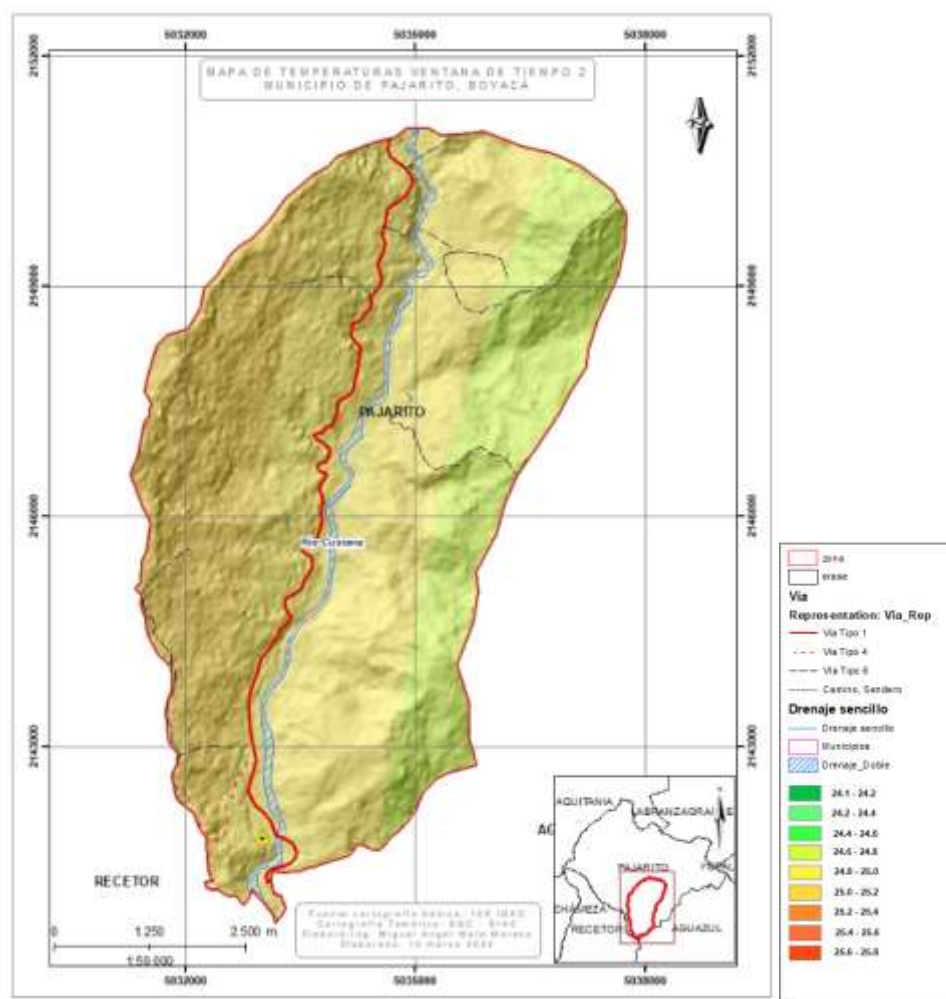


Fuente: Elaboración Propia, ArcGIS.

El promedio de la temperatura para el periodo de tiempo de 1990 -2006, varía según el punto de elevación entre 24.1°C y 24.6°C.

Figura 9.

Mapa Registro de Temperatura (2007-2023)



Fuente: Elaboración Propia ArcGIS.

El promedio de la temperatura para el periodo de tiempo de 2006 -2023, varía según el punto de elevación entre 24.6°C y 25.2°C.

De acuerdo con el registro sísmico, que se encuentra dispuesto en la base de datos del SGC, se realizó el análisis de los datos, para así modelar el mapa sísmico de los últimos treinta años, La información dispuesta por parte de la entidad gubernamental se encuentra dentro de 2 periodos:

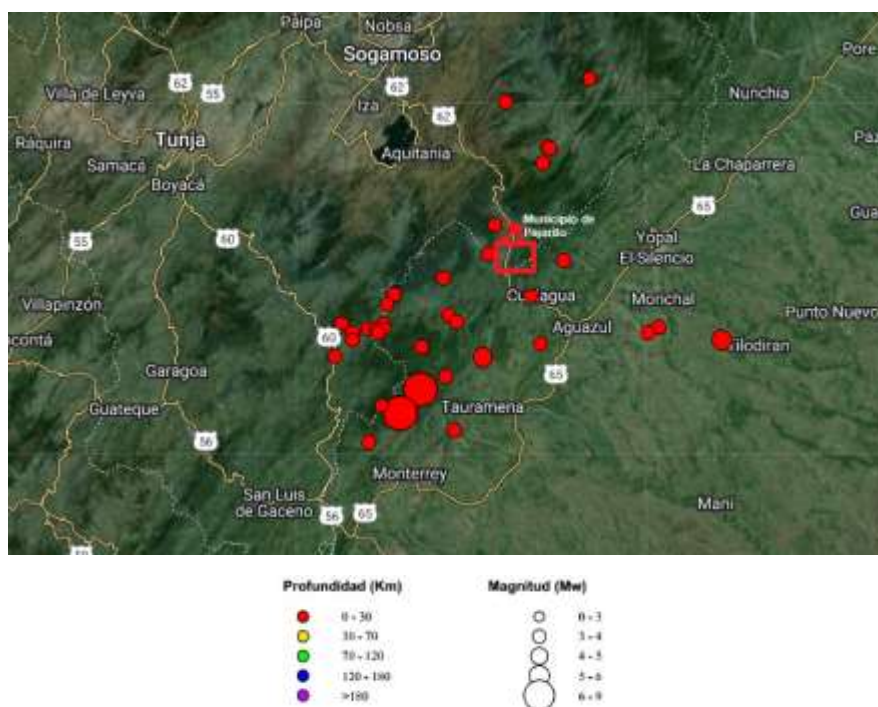
El primer periodo se encuentra comprendido 1-06-1993 al 28-02-2018

El segundo periodo se encuentra comprendido 1-03-2018 a la fecha

En la siguiente imagen se proyecta el registro sísmico de la zona de estudio con radio de influencia de 50 km. El periodo que proyecta se encuentra comprendido 1-06-1993 al 28-02-2018; se evidencian los sismos que cuentan con una magnitud superior a 4.5 en la escala de Richter.

Figura 11.

Registro Sísmico (1993-2018).

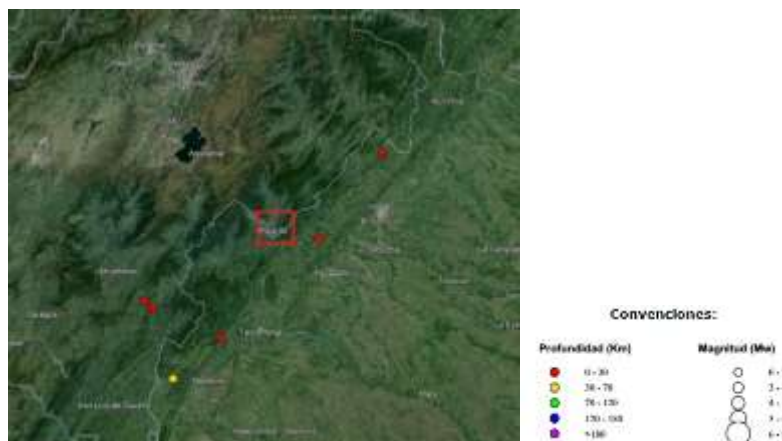


Fuente: Catalogo de Sismicidad, Servicio Geológico Colombiano.

En la figura No 11, se proyecta el registro sísmico de la zona de estudio con radio de influencia de 50 km. El periodo que proyecta se encuentra comprendido 01-06-1993 al 28-02-2018; se evidencian los sismos que cuentan con una magnitud superior a 4,5 en la escala de Richter.

Figura 12.

Registro Sísmico (2018-2023)

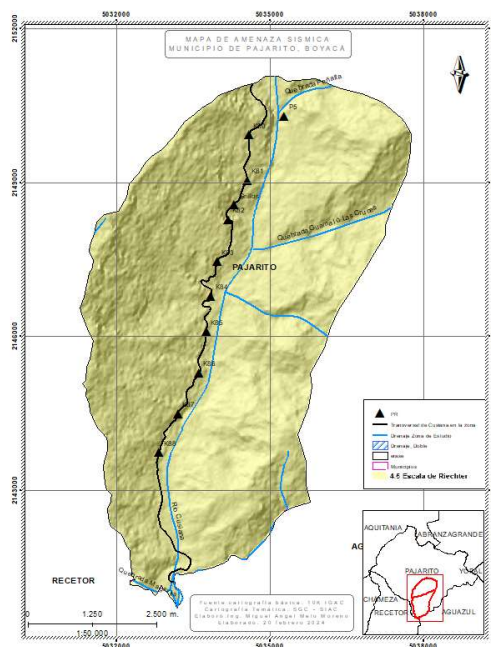


Fuente: Catalogo de Sismicidad, Servicio Geológico Colombiano.

Se evidencia que en los dos periodos registrados por parte del servicio Geológico Colombiano, el promedio de los sismos con una escala superior a cuatro en la escala de Richter es de 4.5 y una profundidad de 5.5km, dentro de un radio de influencia de 60km, conforme a la escala de Richter, son sismos moderados, en el cual se interpreta como: Moderado, sentido por algunas personas.

Figura 13.

Mapa Sismicidad (1993-2023).



Fuente: Elaboración Propia ArcGIS.

Geomorfología

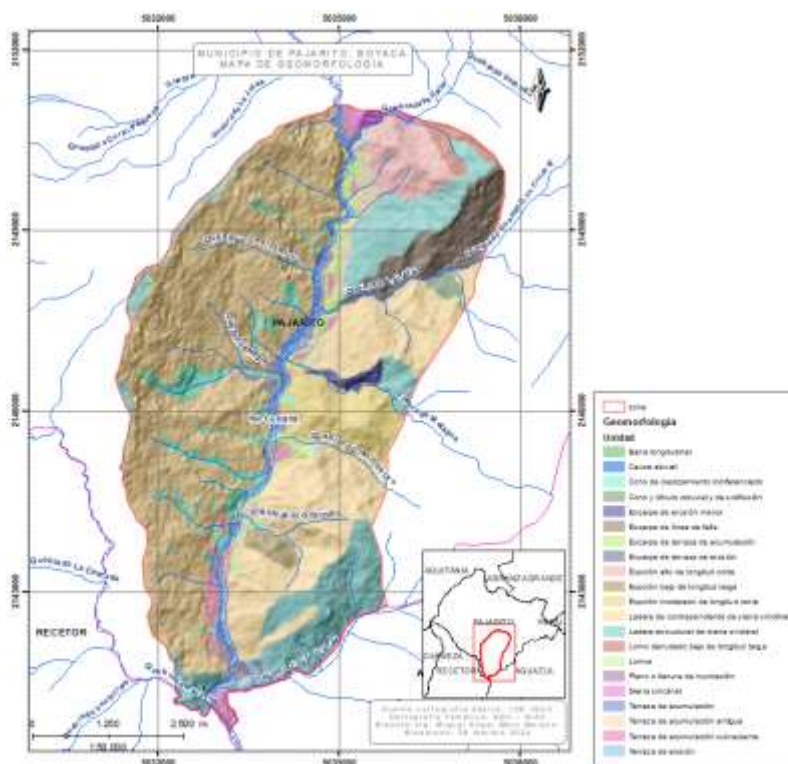
El componente geomorfológico se encuentra clasificado como un factor condicionante dentro de las metodologías de zonificación de amenazas por movimientos de masa del Servicio Geológico Colombiano (SGC), este factor cuenta con diferentes características relevantes a tener en cuenta para su análisis como lo son:

- Rangos de intervalos de altura o relieve relativo
- Rangos de inclinación de la ladera
- Longitud de ladera
- Patrón de drenaje

Para el respectivo análisis se identificaron las unidades y subunidades geomorfológicas que se encuentran descritas en las planchas geomorfológicas 192 y 211 del Servicio Geológico Colombiano. Conforme a la información dispuesta se realizó el enlace digital y de modelación de las dos planchas en el aplicativo ArcGIS, ya que la zona de estudio se encuentra en la frontera de ambas planchas.

Figura 14.

Mapa Geomorfológico.



Fuente: Elaboración Propia ArcGIS, Plancha Geomorfológica 192 y 211. Servicio Geológico Colombiano

La zona en estudio se encuentra en el flanco sur del Sinclinal que genera el río Cusiana, la diferencia de nivel que se genera desde la corona de la ladera a su base es de aproximadamente 900m, con pendientes que van desde los 10° hasta 80° respecto a la horizontal.

El mapa geomorfológico modelado en la aplicación ArcGIS muestra exclusivamente y a detalle las subunidades estructurales que se encuentran exactamente dentro del contorno del corredor en estudio, el cual guarda una correlación de la descripción de las subunidades, con las geoformas vistas en campo, los puntos donde se presenta mayores deslizamientos y movimientos en masa, se encuentra clasificado como conos de deslizamiento indiferenciado, constituidos por una gran variedad de rocas y suelos que constituyen a las unidades en estudio.

De manera general la subunidad geomorfológica predominante de la zona de estudio es la Ladera de Contrapendiente Sierra Sinclinal (Ssslc), que se caracteriza por ser una superficie inclinada, de longitud moderada a larga, de forma recta.

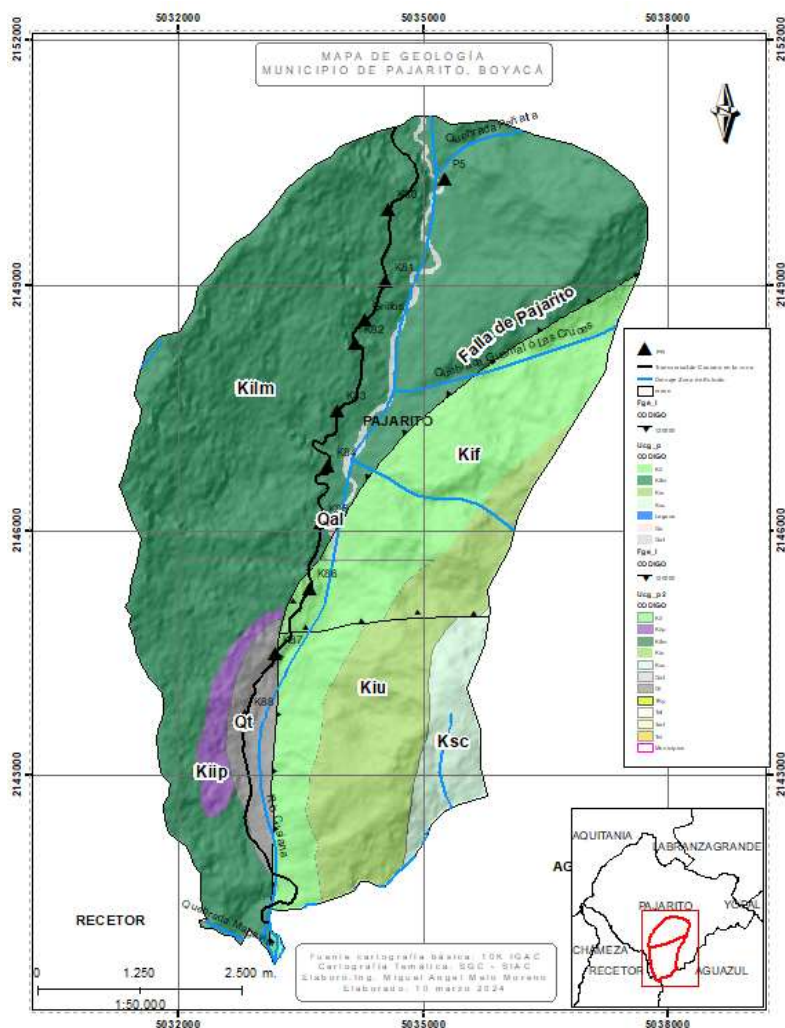
Geología

El componente geológico se encuentra clasificado como un factor condicionante dentro de las metodologías de zonificación de amenazas por movimientos de masa del Servicio Geológico Colombiano (SGC), este factor cuenta con diferentes características relevantes a tener en cuenta para su análisis como lo son:

- Unidad Geológica
- Formación Geológica
- Litología
- Sistema de Fallas
- Era Geológica

Para el respectivo análisis se identificaron las unidades y formaciones geológicas que se encuentran descritas en las planchas geológicas 192 y 211. Conforme a la información dispuesta se digitalizó y se llevó a la modelación en el aplicativo ArcGIS.

Figura 15.
Mapa Geológico.



Fuente: Elaboración Propia ArcGIS, Plancha Geologica192 y 211.

Al igual que las modelaciones de cada factor u/o amenaza se realizó el enlace de las planchas geológicas mediante la herramienta tecnológica informática ArcGIS, permitiendo de esta manera, visualizar la continuidad fallas geológicas junto con las formaciones que se encuentra circundantes al corredor vial.

que presentan mayores procesos de inestabilidad de toda la transversal de Cusiana, como es la falla presenta en el puente los grillos.

evidencia que en la zona del PR 80+000 al PR 82+000 es la zona aproximada donde se intercepta la falla de pajarito con el corredor vial.

Aplicación y Adaptación de los Métodos con Enfoque Cualitativo y Cuantitativo, para la

Zonificación de Amenazas.

La aplicación y adaptación de los métodos que se tienen determinados en el presente análisis, tiene como objetivo determinar dentro del corredor vial en estudio, cuáles son las subzonas que tienen mayor probabilidad de amenaza, evaluando y ponderando mediante la superposición de mapas con su respectiva operación algebraica.

Gracias a la cartografía digitalizada y generada en la etapa anterior, se da continuidad a la adaptación de la metodología de Mora -Vahrson y el algebra de mapas, para realizar la correlación y asignación de valores conforme a las características de cada uno de los factores condicionantes y de disparo, de acuerdo al grado de influencia e incidencia.

Determinación de los Factores Indicadores

La metodología de Mora -Vahrson al igual que las guías metodológicas para la zonificación de las amenazas por movimientos en masa, del servicio geológico, clasifica los factores de amenaza como condicionantes y detonantes.

Factores Condicionantes o de Susceptibilidad

Los factores condicionantes se identifican como aquellos que hacen parte de manera constante en el medio como es el caso del relieve, geomorfología, litología y las condiciones úsales de humedad natural.

Factores Detonantes o de disparo

Los factores detonantes se identifican como los estímulos externos que junto con la combinación de los factores condicionantes generan un movimiento en masa, como la lluvia y los sismos.

Determinación de Amenaza de deslizamientos

Dando continuidad con la metodología de Mora -Vahrson, se determina la amenaza, mediante una ecuación algebraica empírica y sencilla como la siguiente:

$$Ad = (Cond) * (Disp) \quad (1)$$

En dónde:

$$Ad = \text{Amenza de deslizamiento} \quad (2)$$

$$Cond = \text{Factores Condicionantes} \quad (3)$$

$$Disp = \text{Factores de disparo} \quad (4)$$

Es decir:

$$Ad = (Rr * G * H) * (S + L) \quad (5)$$

Parámetros Condicionantes.

$$Rr = \text{Índice de Influencia del relieve Relativo} \quad (6)$$

$$G = \text{Índice de Influencia geomorfológico y geológico} \quad (7)$$

$$H = \text{Índice de Influencia de la humedad Usual del Suelo.} \quad (8)$$

Parámetros de Disparo.

$$S = \text{Índice de Influencia de Intensidad Sísmica Máxima} \quad (9)$$

$$LL = \text{Índice de Influencia de intensidad de Lluvias.} \quad (10)$$

Análisis de los factores

A continuación, se realiza la correlación y asignación de valores conforme a las características de cada uno de los factores.

Índice de Influencia del relieve relativo. El índice de influencia del relieve relativo establece de acuerdo a cada unidad de área la diferencia de elevación, que se precisa, conforme a la escala del mapa, este se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Rr = \frac{dh_{max}}{A}; (m/m^2) \quad (11)$$

Donde:

dhmax = mayor diferencia de elevación en el área.

A = Área

Para el presente factor condicionante se realizó la subdivisión de la zona de estudio, en una rejilla que contiene cuadrantes de 250m X 250m, para así analizar la diferencia de elevación máxima en un área de 62,500 m², teniendo en cuenta la calificación del factor del relieve relativo dispuesto en la tabla No 1 de la metodología de Mora – Vahrson.

Tabla 12.

Índice de influencia de relieve relativo.

dhMax	Calificativo	Valor del parámetro Rr
0 – 19	Muy bajo	1
20 – 44	bajo	2
45 – 75	Moderado	3
76– 125	Mediano	4
126– 200	alto	5

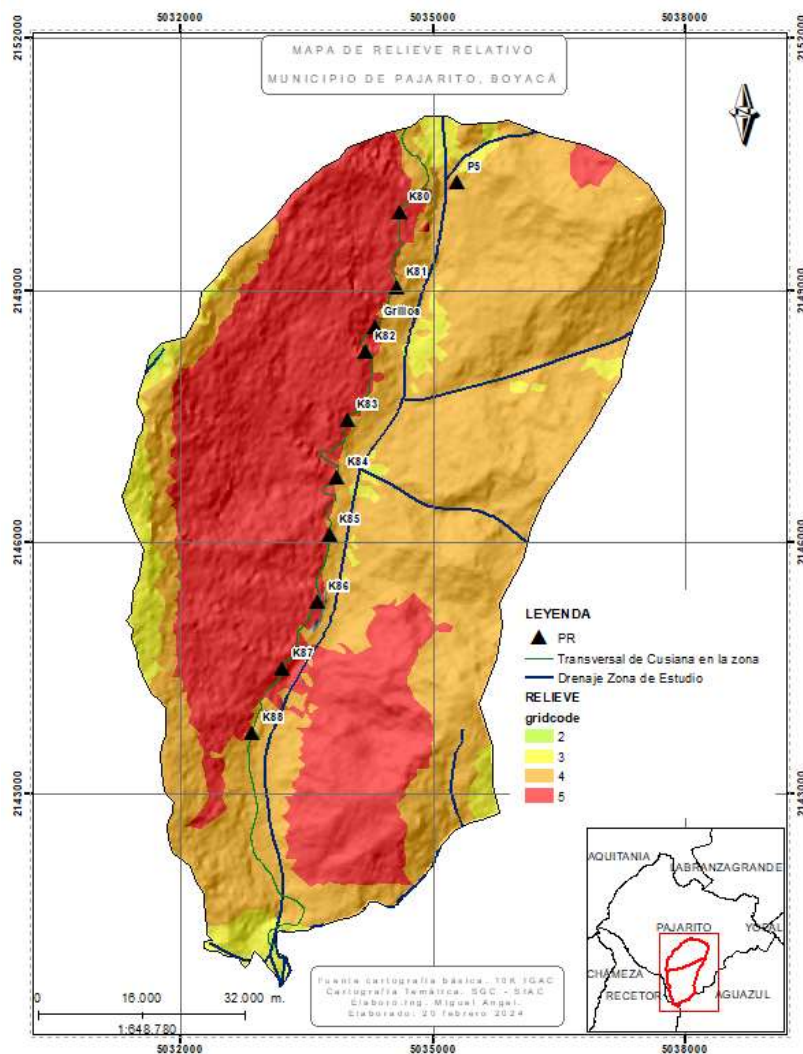
Elaboración Propia. Fuente: Metodología Mora – Vahrson (1992) Determinación “A priori” de la amenaza de deslizamientos Utilizando indicadores morfodinámicos.

Como resultado se obtiene los Siguietes mapas.

En el Siguiete mapa se presenta la rejilla de relieve relativo, subdividido por áreas de 1 km². En cada vértice se evidencia la elevación en m.s.n.m.

Figura 17.

Mapa del Índice de Relieve relativo



Fuente: Elaboración Propia, ArcGIS.

Cada recuadro dentro del mapa tiene un valor según la escala del relieve relativo, clasificado según la tabla No 10 y su valor se evidencia en el cuadro de convenciones, siendo el mapa No 16 parte del insumo del álgebra de mapas.

Índice de Influencia Geomorfológico y Geológico.

En la determinación del índice de influencia Geomorfológico y Geológico, se jerarquizó en una escala de 1-5, las características de cada una de las unidades geomorfológicas y geológicas de manera cualitativa y cuantitativa, conforme al nivel de susceptibilidad a movimientos y deslizamientos en masa.

Tabla 13.

Índice de influencia Geomorfológico.

Unidad Geomorfológica	Susceptibilidad a Deslizamientos	Razonamiento (Cualitativo)
Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	Muy Alta (5)	Pendientes pronunciadas y orientadas en sentido contrario a la inclinación del estrato. - Mayor potencial de infiltración de agua y acumulación de materiales sueltos. - Menor estabilidad debido a la convergencia de esfuerzos
Cono y lobulo coluvial y de solifluxion	Muy Alta (5)	Se presenta ladera denutiva, debido a procesos de erosión intensos, Escarpe, con pendiente pronunciada, perdida y arrastre de material
Cono de deslizamiento indiferenciado	Alta (4)	Presencia de depósitos de material deslizado, indicando eventos previos y potencial recurrencia. - Superficie irregular y fracturada, favoreciendo la inestabilidad. - Zonas de acumulación de agua y materiales sueltos que aumentan el riesgo.
Ladera estructural de sierra sinclinal	Moderada a alta (3)	Pendientes inclinadas paralelas a la inclinación del estrato, con potencial de deslizamiento rotacional. - Posibilidad de presencia de planos de debilidad y fracturas que facilitan el movimiento. - Susceptibilidad variable dependiendo de la pendiente, cohesión del material y condiciones hídricas.
Sierra anticlinal	Moderada (2)	Estructura interna con estratos buzantes hacia el exterior, generando mayor estabilidad. - Pendientes generalmente menos pronunciadas que en laderas de sinclinales. - Menor potencial de infiltración de agua y acumulación de materiales sueltos.
Espolón alto de longitud corta	Moderada (2)	La pendiente pronunciada es el principal factor de riesgo, pero la presencia de vegetación y la cohesión del suelo pueden ayudar a reducir el riesgo
Cauce Aluvial	Baja (1)	Superficie plana o con pendiente suave, reduciendo la fuerza impulsora del deslizamiento. - Material granular permeable que facilita el drenaje del agua. - Ausencia de

estratos inclinados o planos de debilidad que favorezcan el movimiento

Elaboración Propia. Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2012). Metodología Sistemática para la Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados la zonificación de Amenaza por movimientos en masa escala 1:100.000.

Tabla 14.

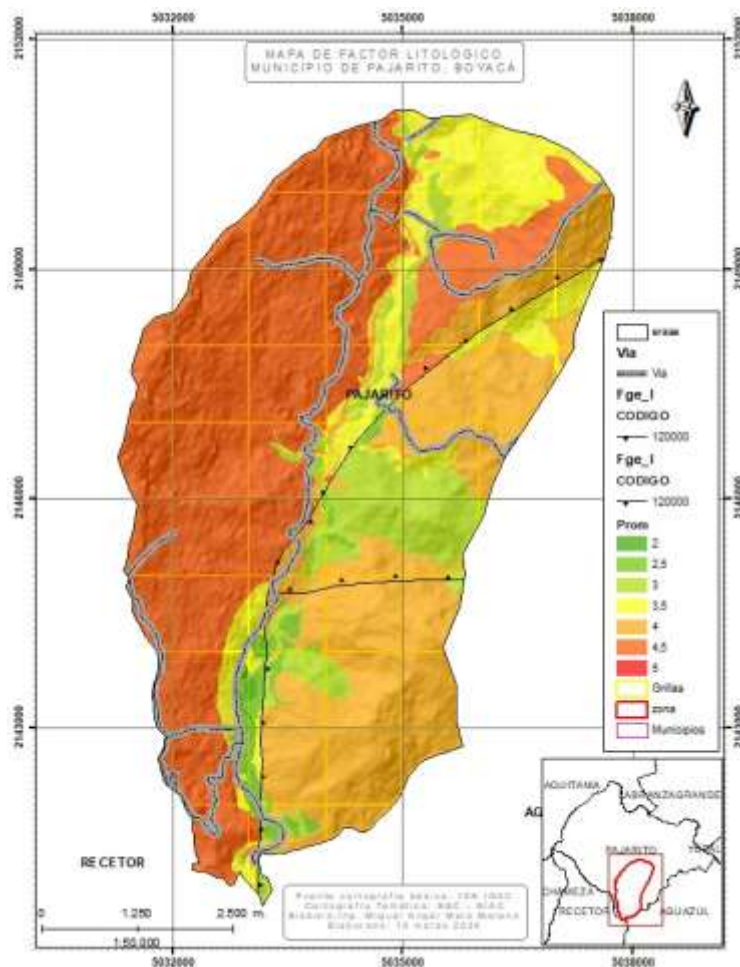
Índice de influencia Geológico.

Unidad Geológica	Susceptibilidad a Deslizamientos	Razonamiento (Cualitativo)
Formación Lutitas de Macanal	Muy Alta (5)	Alta susceptibilidad debido a su composición arcillosa, estratificación inclinada y presencia de agua subterránea. La Falla de Pajarito aumenta aún más la susceptibilidad al generar fracturas y zonas de debilidad.
Cuaternario Aluvial	Muy Alta (5)	Alta susceptibilidad por su material suelto y no consolidado, especialmente en zonas con pendientes y cursos de agua. La Falla de Pajarito incrementa significativamente el riesgo de deslizamientos en depósitos aluviales cercanos a su traza.
Formación Chipaque	Moderada a alta (3)	Susceptibilidad moderada a baja, principalmente en zonas con pendientes suaves y buen drenaje. La Falla de Pajarito puede generar inestabilidades en algunos sectores con fracturas o alteraciones.
Cuaternario Terrazas	Moderada (2)	Susceptibilidad baja a moderada, dependiendo de la granulometría del material y la pendiente del terreno. La Falla de Pajarito puede generar inestabilidades en terrazas ubicadas en zonas con fracturas o alteraciones.
Rocas Ígneas Pajarito (Apófisis de lamprófidos)	Moderada (2)	Susceptibilidad Baja a moderada, su alta cohesión y resistencia mecánica. La Falla de Pajarito afecta gradualmente la estabilidad de estas rocas.

Elaboración Propia. Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2017). Guía Metodología para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000.

Figura 18.

Mapa del Índice de Influencia de Geología y Geomorfología.



Fuente: Elaboración Propia ArcGIS, Plancha Geológica y Geomorfológica 192 y 211.

Cada área dentro del mapa tiene un valor según la escala del índice geomorfológico y geológico clasificado según las tablas No 11 y 12, y su valor se evidencia en el cuadro de convenciones, siendo la figura No 18 parte del insumo del algebra de mapas.

Índice de Influencia de la humedad Usual del Suelo.

El índice de influencia de humedad se zonifica en dos zonas, conforme se encuentran las dos estaciones pluviométricas en el municipio de pajarito, teniendo en cuenta la descripción de este índice en las tablas No 3 y 4 de la Metodología de Mora -Vahrson.

Tabla 15.

Clasificación de los promedios mensuales máximos.

Precipitación promedio (mm/mes)	Valor Asignado
< 125	0
125 -250	1
> 250	2

Elaboración Propia. Fuente: Metodología Mora – Vahrson (1992) Determinación “A priori” de la amenaza de deslizamientos Utilizando indicadores morfodinámicos.

El valor acumulado se obtiene a partir de la precipitación promedio acumulada a anual de los 12 meses del año asignado el valor de este como se evidencia en la siguiente tabla.

Tabla 16.

Índice de influencia del factor humedad.

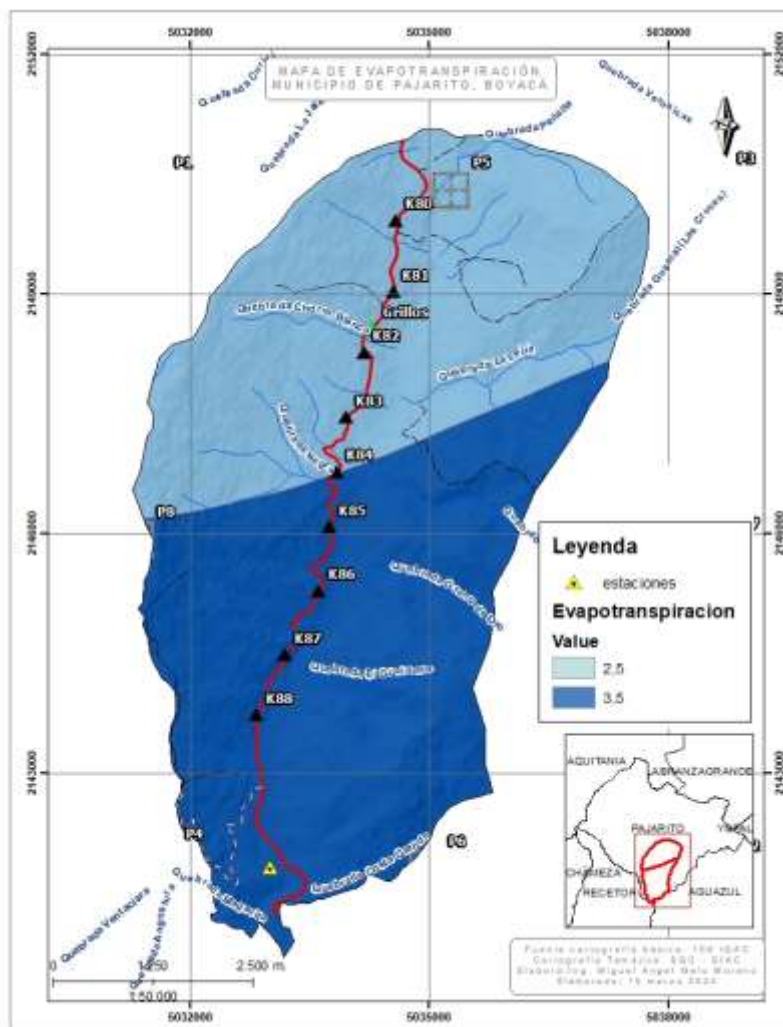
Valor Acumulado	Calificativo	Valor parámetro
0 - 4	Muy bajo	1
5 - 9	bajo	2
10 -14	Medio	3
15 - 19	alto	4
20 - 24	Muy alto	5

Elaboración Propia. Fuente: Metodología Mora – Vahrson (1992) Determinación “A priori” de la amenaza de deslizamientos Utilizando indicadores morfodinámicos.

Cada área dentro del mapa tiene un valor según la escala del índice de Influencia de la humedad Usual del Suelo clasificado según las tablas No 15, y No 16 y su valor se evidencia en el cuadro de convenciones, siendo la figura No 18 parte del insumo del álgebra de mapas.

Figura 19.

Mapa del Índice de Influencia del factor de Humedad.



Fuente: Elaboración Propia, ArcGIS.

Índice de Influencia de la Intensidad Sísmica.

La influencia de la actividad sísmica se caracteriza por ser un factor detonante, teniendo en cuenta que la zona a evaluar se encuentra en su gran mayoría por suelos denudativos, altamente meteorizados, con capacidad de almacenar agua y producir procesos de reptación. Haciendo que un evento sísmico pueda producir un deslizamiento inmediato.

En la siguiente tabla se identifica los registros históricos de la zona de estudio, clasificándolos según la escala de Richter, definiéndolos dentro de una escala de clasificación de 1-5, cada a la situación específica.

Dentro del mapa tiene un valor según la escala del Índice de Influencia de la Intensidad Sísmica clasificado según la tabla No 17 y su valor es de 4.5 en la escala de Richter, siendo la figura No 20 parte del insumo del algebra de mapas.

Índice de Influencia de intensidad de Lluvias.

El índice de influencia del factor de intensidad de precipitación, se determinó con base al análisis del índice que se realiza en la metodología de Mora -Vahrson calculando el promedio de las lluvias máximas en 24 horas.

Tabla 18.

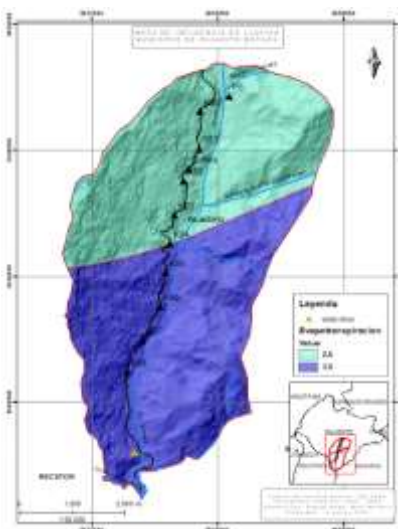
Indice de intensidad de lluvias.

Lluvias máximas n < 10 años promedio (mm)	Calificativo	Valor parámetro
< 50	Muy bajo	1
50 - 90	bajo	2
91 -130	Medio	3
131 - 175	alto	4
> 175	Muy alto	5

Elaboración Propia. Fuente: Metodología Mora – Vahrson (1992) Determinación “A priori” de la amenaza de deslizamientos Utilizando indicadores morfodinámicos.

Figura 21.

Mapa del Índice de Influencia de lluvias.



Fuente: Elaboración Propia, ArcGIS.

Dentro del mapa tiene un valor según la escala del Índice de Influencia de la Intensidad de lluvias clasificado según las tablas No 18 y su valor se evidencia en el cuadro de convenciones, siendo la figura No 19 parte del insumo del algebra de mapas.

Resultados

Determinación amenaza de deslizamiento

De acuerdo a cada uno de los índices de los factores multiamenaza. Se realiza la jerarquización, clasificación de las características y parámetros establecidos de cada uno conforme al nivel de susceptibilidad, asignándosele un valor en una escala de 1 a 5. Estos valores fueron ingresados al Sistema de Información Geográfico ArcGIS, en el cual se le indico que conforme a las ecuaciones No 1 y 5, realizara el procesamiento matemático para obtener los mapas de potencial de deslizamiento por lluvias, potencial de deslizamiento por sismos y el mapa de deslizamiento, el cual recopila información de cada uno de los factores condicionantes y detonantes.

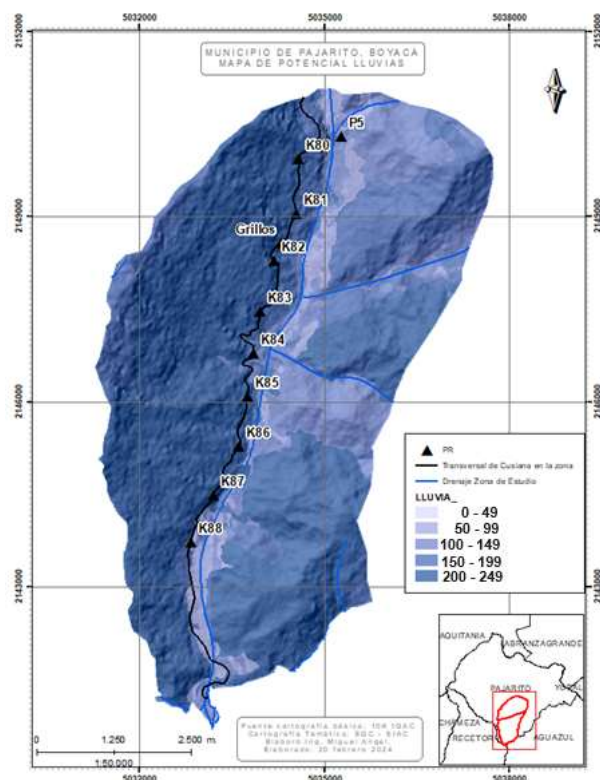
Para cada uno de los factores detonantes de acuerdo a las ecuaciones 5 y 6 de la metodología de Mora - Vahrson, se determinó:

Potencial generador de deslizamiento por lluvias.

$$PDL = (Rr * G * H) * (LI) \quad (12)$$

Figura 22.

Mapa potencial generador de deslizamiento por lluvias.



Fuente: Elaboración Propia, ArcGIS.

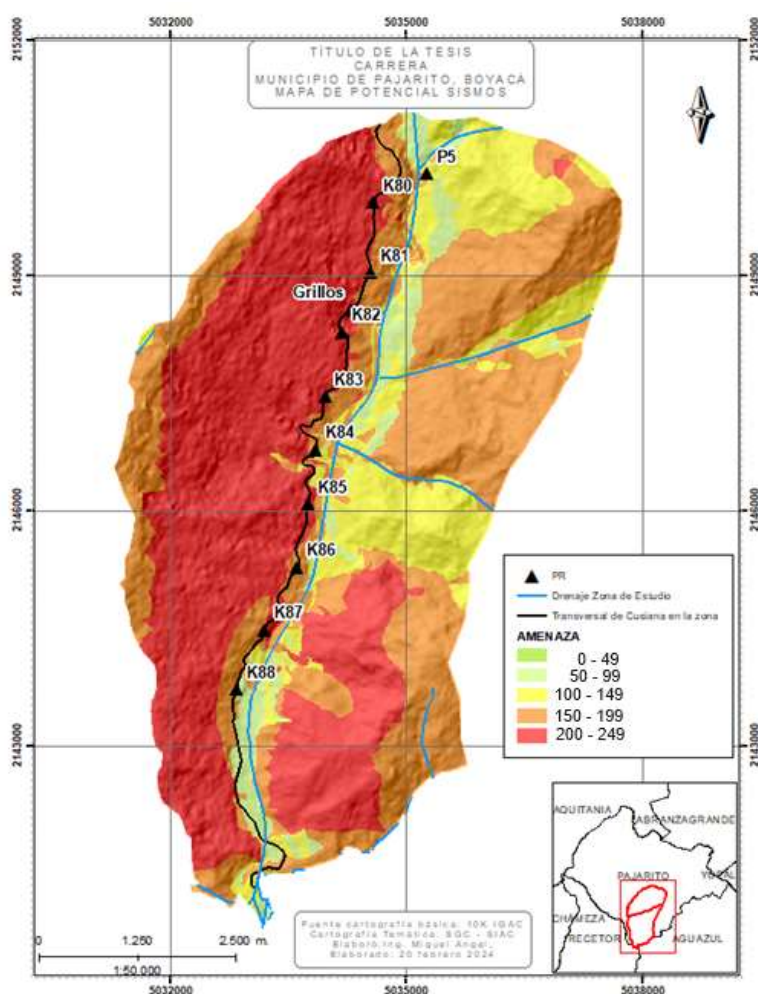
El mapa registra cada una de las subzonas que cuentan con susceptibilidad de deslizamiento de acuerdo los factores condicionantes y el factor detonante por lluvia obteniendo como resultado el potencial por deslizamiento.

Potencial generador de deslizamiento por Sismo.

$$PDS = (Rr * G * H) * (S) \quad (13)$$

Figura 23.

Mapa potencial generador de deslizamiento por sismos.



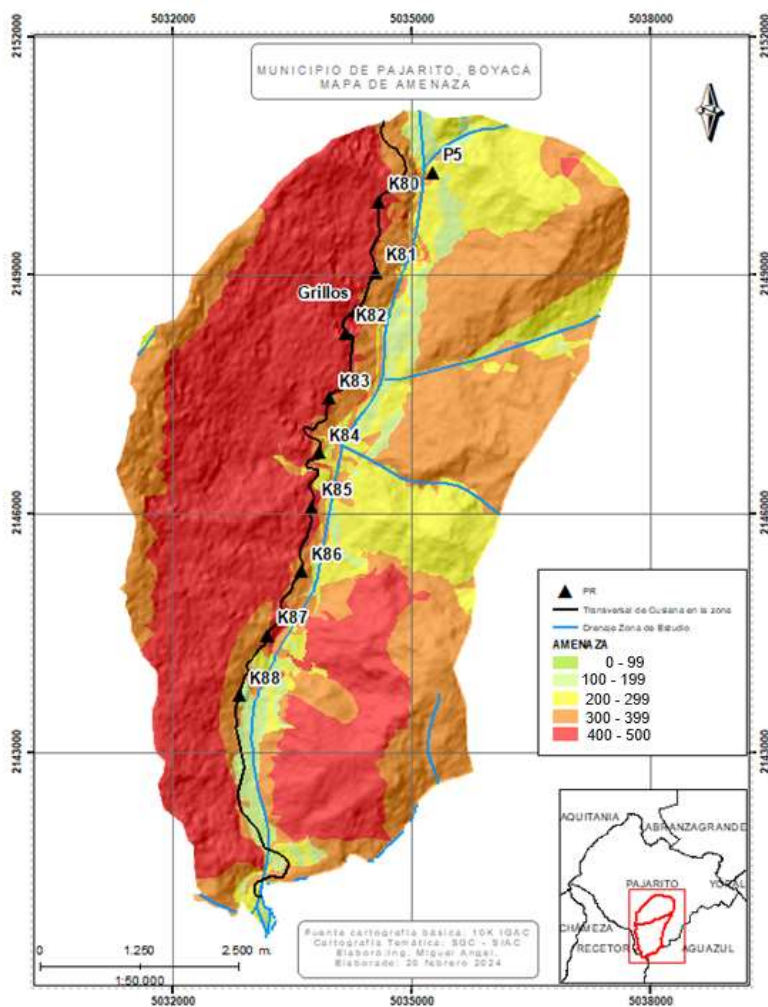
Fuente: Elaboración Propia, ArcGIS.

El mapa registra cada una de las subzonas que cuentan con susceptibilidad de deslizamiento de acuerdo los factores condicionantes y el potencial de Sismos.

Una vez determinado los potenciales generadores de deslizamiento de acuerdo a cada factor detonantes, se procede a realizar el cálculo de amenaza por deslizamiento en el cual integra el análisis multiamenaza en un solo mapa, conforme a las ecuaciones No 1 y 5.

Figura 24.

Mapa de Amenaza de deslizamientos.



Fuente: Elaboración Propia, ArcGIS.

Clasificación de los grados de amenaza de deslizamientos, según la aplicación de la ecuación No 1 y 5.

Tabla 19.

Clasificación de Amenaza de deslizamiento.

Potencial	Calificativo	Valor parámetro
-----------	--------------	-----------------

0 - 99	Muy bajo	1
100 - 199	bajo	2
201 - 299	Medio	3
301 - 399	alto	4
400 - 499	Muy alto	5

Fuente: Elaboración Propia.

Análisis de los resultados

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS, se realiza el traslado de las capas de geomorfología, potencial de deslizamiento por lluvias, potencial de deslizamiento por sismos y el análisis de multi amenaza al aplicativo Google Earth Pro. Permitiendo el acceso a la visualización de los datos geoespaciales de cada uno de los factores de amenaza, posibilitando la integración y el intercambio de información, para así interactuar y proceder con el análisis multiamenaza de manera sencilla del Tramo vial ubicado en el PR 80+000 al PR 87+000 de la vía Transversal de Cusiana.

Figura 25.

Capa de Geomorfología de la zona.

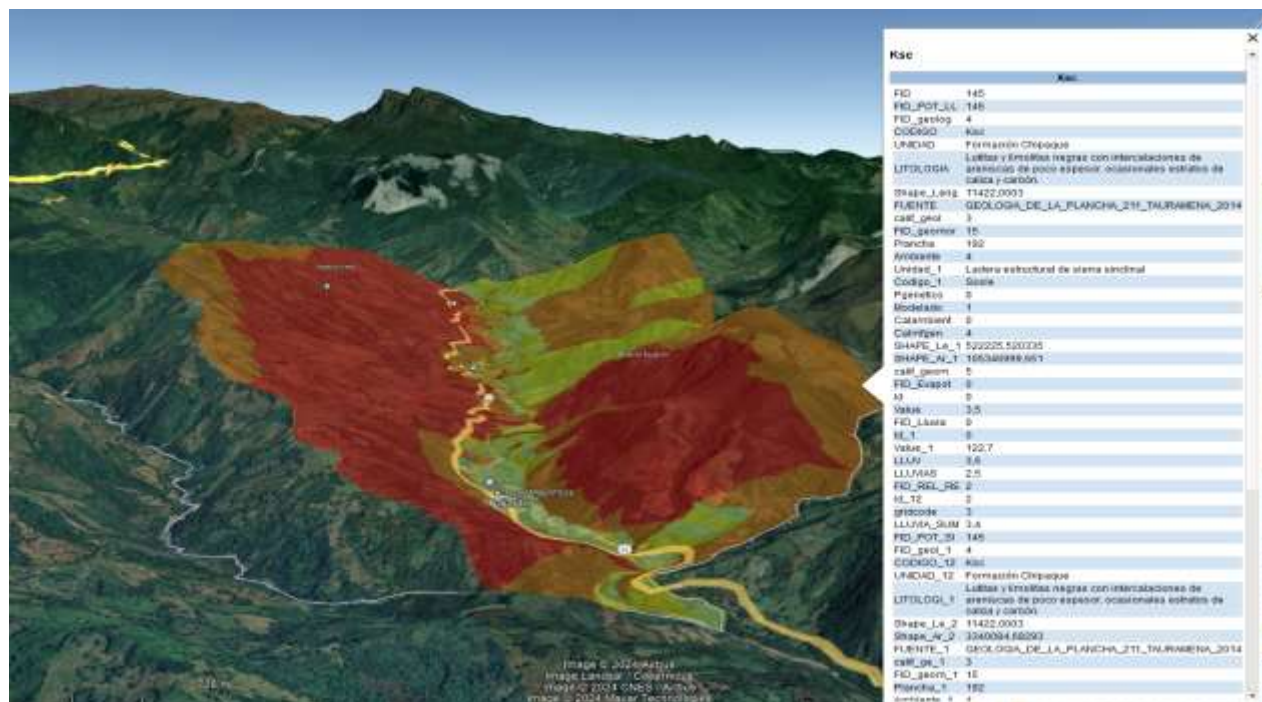


Fuente: Elaboración Propia, ArcGIS, Google Earth Pro.

En la anterior imagen, se observa la sobreposición de la capa Geomorfológica con la imagen satelital en 3D de la zona de estudio, donde se caracteriza geomorfológicamente cada ladera, conforme a la información dispuesta en las bases de datos del Servicio Geológico Colombiano, igualmente el aplicativo Google Earth Pro permite que se despliegue una ventana con la información relevante de cada zona.

Figura 28.

Capa Análisis de deslizamiento



Fuente: Elaboración Propia, ArcGIS, Google Earth Pro.

En La figura No 28, se muestra la capa de análisis de deslizamiento, está recopilada toda la información del presente trabajo obteniendo como resultado, la modelación y superposición de todas las características de cada uno de los factores que presenta incidencia en el presente trabajo.

Evaluación de la Amenaza de los elementos de infraestructura expuesto.

Una vez verificado el resultado de la superposición de las capas que identifican cada factor de amenaza, se evidencia que los factores condicionantes que presentan mayor incidencia en el algebra de mapas es el relieve relativo, geología y el factor detonante que genera inestabilidad y propicia el deslizamiento es la lluvia.

Todos los elementos de infraestructura que se encuentran dentro del tramo vial ubicado en el PR 80+000 al PR 87+000 de la transversal de cusiana, se encuentran dentro del nivel máximo de amenaza debido a que la sumatoria de todos los factores en dicha zona son máximos, mayormente influenciados por su alto relieve relativo, combinado con su unidad lito las fuertes precipitaciones hacen que cada elemento.

Tabla 20.

Evaluación de la Amenaza de los elementos de infraestructura expuestos.

No	Abscisa	Coordenadas	Elevacion (m)	Nombre del Elemento	Factores Condicionantes y Detonantes						Foto	MAPA
					Lluvias Precipitación Max 24h(mm)	Temperatura Promedio (°C)	Sismos Escala ritcher	Geomorfología	Geología	Relieve Relativo		
1	79+900	5°21'28.80" N 72°41'12,67" O	1141	Ladera denudativa (79+900)	112 mm	24,6	4.5	Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	Formación Lutitas De Macanal, Lutitas negras con intercalaciones de areniscas.	126– 200		
2	80+000	5°21'25.09" N 72°41'16,03" O	1132	Muro de contención en gavión	112 mm	24,6	4.5	Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	Formación Lutitas De Macanal, Lutitas negras con intercalaciones de areniscas.	126– 200		
3	81+250	5°20'49.29" N 72°41'20,18" O	1030	Puente los grillos	112 mm	24,6	4.5	Cono de deslizamiento indiferenciado	Formación Lutitas De Macanal, Lutitas negras con intercalaciones de areniscas.	126– 200		
4	81+750	5°20'36.78" N 72°41'29,09" O	1027	Puente Chorro Blanco	112 mm	24,6	4.5	Cono denudativo deslizamiento indiferenciado	Formación Lutitas De Macanal, Lutitas negras con intercalaciones de areniscas.	126– 200		
5	82+650	5°20'13.20" N 72°41'28,29" O	980	Puente Berbeno	112 mm	24,6	4.5	Cono denudativo deslizamiento indiferenciado	Formación Lutitas De Macanal, Lutitas negras con intercalaciones de areniscas.	126– 200		
6	83+650	5°19'50.63" N 72°41'46,05" O	951	Ladera denudativa (83+650)	112 mm	24,6	4.5	Cono denudativo deslizamiento indiferenciado	Formación Lutitas De Macanal, Lutitas negras con intercalaciones de areniscas.	126– 200		
7	84+300	5°19'37.60" N 72°41'45,00" O	913	Puente Quebrada Negra	122 mm	25.2	4.5	Cono denudativo deslizamiento indiferenciado	Formación Lutitas De Macanal, Lutitas negras con intercalaciones de areniscas.	126– 200		
8	85+100	5°19'18.69" N 72°41'43,76" O	904	Ladera en proceso de Reptación	122 mm	25.2	4.5	Ladera de contrapendiente de sierra sinclinal	Formación Lutitas De Macanal, Lutitas negras con intercalaciones de areniscas.	126– 200		
9	86+500	5°19'18.69" N 72°41'43,76" O	904	Puente Orquídea	122 mm	25.2	4.5	Cono denudativo deslizamiento indiferenciado	Formación Fômeque, Alternancia de lutitas y limolitas negras, areniscas y calizas de poco espesor.	126– 200		
10	87+000	5°18'27.13" N 72°42'04,50" O	948	Talud con Terraceo, apuntalamiento	122 mm	25.2	4.5	Cono denudativo deslizamiento indiferenciado	Cuaternario Terrazas aluviales	126– 200		

Fuente: Elaboración Propia.

Conclusiones

El presente análisis es el resultado de la implementación y adaptación de una metodología, que permitió realizar la evaluación de los escenarios de riesgo que se presentan a lo largo del tramo vial ubicado en el PR 80+000 al PR 87+000 de la transversal de Cusiana, siendo este tramo el sector que presenta mayor cantidad de deslizamientos y movimientos en masa; teniendo en cuenta diferentes métodos con enfoque cualitativo y cuantitativo, apoyando del Sistema de Información Geográfica ArcGIS.

Mediante la visita de campo, en la cual se realizó un recorrido desde el PR0+000, hasta PR116+000 de la transversal de Cusiana, junto con varios sobrevuelos en dron y el análisis de la fotointerpretación de aerofotografías tomadas por el IGAC. Se identificó y delimito que la zona de estudio con mayor cantidad de movimientos en masa se encuentra en el tramo del PR 80+000 al PR87+000.

Conforme al procedimiento que se encuentra descrito en la Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000 del Servicio Geológico Colombiano y la metodología *Determinación “a priori” de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos* (Mora & Vahrson, 1992), se realizó la identificación y clasificación de las amenazas condicionantes y detonantes que influyen en el tramo vial en estudio.

Se realizó la evaluación y clasificación de las amenazas condicionantes y detonantes que influyen en el corredor vial en estudio, mediante la caracterización de las condiciones hidrológicas, geológicas y geomorfológicas, que se presentan en la transversal de Cusiana, de acuerdo con la información obtenida en sitio y bases de datos de las entidades gubernamentales que tienen el objetivo el monitoreo y seguimiento de los diferentes recursos naturales, como lo son el Instituto de Hidrología Meteorología Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM) y el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Se evaluó cuantitativa y cualitativamente cada uno de los factores mediante la asignación de valores, en una escala de 1 a 5 de acuerdo con los rasgos más significativos de cada una de ellos teniendo en cuenta el nivel de susceptibilidad a deslizamiento y movimientos en masa. Apoyado mediante imágenes satelitales, registro fílmico (dron), Guías metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (SGC) y la herramienta informática de Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS).

Una vez evidenciada cada una de las características que identifica cada factor junto con su componente cualitativo, se realiza el álgebra de mapas que se encuentra descrita en la metodología *Determinación “a priori” de la amenaza de deslizamientos utilizando indicadores morfodinámicos* (Mora & Vahrson, 1992), para así obtener el mapa de amenaza, apoyado mediante el Sistema de Información Geográfico ArcGIS.

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una zonificación detallada de la amenaza por movimientos en masa, la metodología adaptada permitió conocer y caracterizar las áreas con mayor susceptibilidad a los factores condicionantes y detonantes, considerando que los procesos geomorfológicos, geológicos, climáticos y sísmicos son parte clave para entender el proceso del cálculo de las amenazas.

Este tipo de vías, que cuentan con un sin número de afectaciones no deben ser evaluadas desde una sola disciplina o ciencia, deben ser evaluadas de manera integral, teniendo en cuenta que este tipo de análisis hace parte de un Plan de Ordenamiento. Las entidades estatales deben evaluar antes de plantear la reconstrucción de una vía existente, plantear la posibilidad de plantear un nuevo trazado, ya que pueden incidir a que los contratistas que realizan la ejecución comentan errores.

Principales Hallazgos:

- Se identificaron las áreas con mayor susceptibilidad a movimientos en masa, principalmente estas se encuentran influenciadas por las pendientes pronunciadas, alta pluviosidad, presencia de fallas geológicas y los procesos denudacionales.
- La metodología adaptada permitió integrar y analizar datos espaciales con la asignación y ponderación de las características de cada uno de los factores, reflejando la importancia relativa de cada factor.
- La aplicación de la herramienta SIG, resultó fundamental para la visualización, ponderación, superposición de cada uno de los índices característicos de la zona.
- Se identifica que el trazado actual del tramo vial en estudio se encuentra en la margen del río Cusiana que tiene mayor pendiente y donde se interceptan las fallas geológicas de cabalgamiento de Pajarito y el mirador, siendo una zona susceptible.

Contribuciones del estudio:

- Este estudio proporciona información valiosa para la gestión del riesgo por movimientos en masa, permitiendo la toma de decisiones informadas para la planificación del trazado del corredor vial reduciendo la vulnerabilidad de los elementos estructurales.
- La metodología adaptada ofrece un enfoque flexible y replicable para la zonificación de amenazas por movimientos en masa en otras regiones, contribuyendo a la prevención y mitigación de desastres naturales.
- La aplicación de herramientas SIG en ArcGIS demuestra el potencial de estas tecnologías para el análisis espacial y la gestión del riesgo en el contexto de los movimientos en masa.

Recomendaciones

- Se recomienda dentro de la política pública fortalecer la implementación de sistemas de información geográfico para la prevención y mitigación del riesgo, incluyendo la revisión de planes de ordenamiento, para la implementación de obras de infraestructura.
- Se sugiere continuar con el monitoreo y seguimiento de los movimientos en masa en el área de estudio, utilizando herramientas de teledetección y sistemas de alerta temprana.
- Se recomienda realizar investigaciones futuras que profundicen en el análisis de los factores desencadenantes de movimientos en masa en el contexto de cambio climático.
- Se recomienda Incrementar el desarrollo de nuevas tecnologías constructivas resilientes fortaleciendo el trabajo interinstitucional de las diferentes entidades públicas y privadas.
- Al utilizar estos modelos constructivos resilientes, disminuye la problemática ambiental, y a su vez el crecimiento económico no se vea interrumpido por la ocurrencia de catástrofes naturales.

Socio económicos

- Se debe dar continuidad a la inversión agroindustrial e implementar nuevos modelos económicos en las regiones de la Orinoquia ya que esta región, es un poco más de la quinta parte de la superficie continental de Colombia y se encuentra en menos del 20% de su capacidad productiva.
- Dentro del crecimiento económico en Colombia se debe dar continuidad a la construcción de la red vial, ya que los proyectos más significativos que se iniciaron hacen más de 20 años se encuentran en un 50 % de ejecución.

Bibliografía

- American Association of State Highway and transportation Officials [AASHTO] (2002). LFRD Highway Design Specifications.
- Acosta Salamanca, M.Y. (2015). *Travesía y lucha: En la protección de la laguna de Tota y sus municipios*. Revistas Semillas, 61/62. aledaño: https://semillas.org.co/apc-aa-files/353467686e6667686b6c676668f16c6c/travesa-y-lucha.-myriam-yaneth-acosta_1.pdf
- Ardila, D. (2016). *Análisis sobre la gestión del riesgo de desastres en Boyacá 2015-2016*. (Simposio Internacional de SIG aplicados a la Sostenibilidad). Esri Colombia:
- Cardona, M & Galeano Ortiz, C. (2017) *Asignación de riesgos en proyectos de infraestructura vial de cuarta generación bajo el esquema de asociación público privada en Colombia: Universidad EAFIT*.
- Congreso de la República de Colombia, (2012), Ley 1523 de 2012. Por la cual se Adopta la Política Nacional Para la Gestión del riesgo de Desastre, Ley U.S.C.
- (2012). https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-3713_documento.pdf
- CMGRD Sogamoso. (2012). *Plan municipal de gestión del riesgo de desastres*. Sogamoso CMGRD. <http://gestiondelriesgo.sogamoso.org/wp-content/uploads/2013/09/PMGRD.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística [DANE]. (2019). *Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018*. DANE. <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/informacion-tecnica/presentaciones-territorio/190727-CNPV-presentacion-Boyaca-Sogamo.pdf>
- Díaz, G.A. (2013). *Mantenimiento y rehabilitación de las carreteras: Duitama – la palmera, ruta 55 tramo 5503 y Sogamoso – Aguazul sector el cruce ruta 62 tramo 6211, Departamento de Boyacá*. Conalvias.
- Departamento Nacional de Planeación [DNP]. (2011). *Caracterización y Modelo de Ordenamiento Sub Regional Para Boyacá*. DNP. https://www.dapboyaca.gov.co/descargas/publicaciones/caracterizacion_modelo_ord_subregional.pdf
- Fondo de prevención y atención de emergencia [FOPAE]. (2012). *Metodologías de análisis de riesgo documento soporte guía para elaborar planes de emergencias y contingencias*.
- Flechas Fajardo G. (2014). *Movimientos sísmicos con epicentro en Boyacá durante el periodo de junio de 1993 y marzo de 2014*.

- Gobernación Boyacá. (2012). *Hidrografía Boyacense*. Gobernación de Boyacá: <https://www.boyaca.gov.co/hidrografia-boyacense/>
- Instituto de hidrología, Meteorología y estudios ambientales. IDEAM (2020), <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/meteorologia-agricola>.
- Leiva, O.Y., Moya Berbeo, H.G., Trejos González, G. A. & Carvajal. (2012), *Propuesta Metodológica Sistemática para la Generación de Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:100.000*, Servicio Geológico Colombiano.
- Molano Cárdenas, S.M. & Torres Rodríguez, M.D. (2018). *Índices geomorfológicos como herramienta para la caracterización de la actividad neotectónica del sistema de fallas de soapaga entre los municipios de corrales y pesca*. SO: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Montejo A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras*. Universidad Católica de Colombia.
- Mora Galvis A.E. (2018). *Informe de asistencia técnica Guayabetal vial Bogotá los llanos*. Gobernación de Cundinamarca.
- Municipio de Sogamoso. (2013a). *Presentación del diagnóstico técnico y construcción de la formulación para la revisión ordinaria del Plan de Ordenamiento Territorial*. Municipio de Sogamoso – Boyacá. <http://sogamoso.org/pot/archivos/13SINTESISGENERAL.pdf>
- Municipio de Sogamoso. (2013b). *Análisis de Situación de Salud con el Modelo de los Determinantes Sociales de Salud*. Municipio de Sogamoso – Boyacá. https://www.boyaca.gov.co/secretariasalud/wp-content/uploads/sites/67/2014/05/images_Documentos_ASIS_2013_ASIS-SOGAMOSO-2013.pdf
- Naciones Unidas (2014). *Manual para la Evaluación de Desastres*, Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Padilla Acosta, J.P., (2019). *Estudios y Diseños para los corredores viales ubicados sobre la ruta 6211 Sogamoso- El Crucero – Aguazul, Departamentos de Boyacá y Casanare, Hito II Volumen III – Estudio de Geología*. Consorcio Ruta 6211, Incoplan SA Iceasca, Pavimentos y Geotecnia S.A.S.
- Patiño López, G. A., Ovalles Camargo, F.A., & Gutiérrez Toledo, F.A. (2006). *Manual para la inspección visual de obras de estabilización. Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras*, Toledo Grupo Técnico – (Convenio 587 de 2003). Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de transporte Colombia, Instituto Nacional de Vías.
- Servicio Geológico Colombiano. [SGC], (2017), *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa Escala 1:25000*.
- Servicio Geológico Colombiano. [SGC], (2017), *Las Amenazas por Movimientos en Masa en Colombia una visión a escala 1:100.000*.

- Suárez Díaz, J. (2009), *Deslizamientos. Análisis Geotécnico*.
- Ulloa C. E., Rodríguez E. & Rodríguez G. I. (2003) *Geología de la plancha 172 paz de rio*. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero – Ambiental y Nuclear, Ingeominas.
- Ulloa C.E, Rodríguez E, Fuquen J.A. & Acosta J.E. (2003) *Geología de la plancha 192 laguna de tota*. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero – Ambiental y Nuclear Ingeominas.
- Ulloa, C., Rodríguez E. & Rodríguez, G. I. (1976). *Geología de las planchas 171 Duitama, 191 Tunja 211 Tauramena y 230 Monterrey*. Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero – Ambiental y Nuclear, Ingeominas.
- Universidad Nacional de Colombia (UNAL) & Alcaldía Municipal de Sogamoso (2013). *Gestión del riesgo de desastres*.
- Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia [UPTC] & Corpoboyacá. (2014). *Determinación de zonas de amenaza y escenarios de riesgo por deslizamiento en el municipio de Jericó, departamento de Boyacá*.
- Velandia, F. (2005). Interpretación de transcurrencia de las fallas Soapaga y Boyacá a partir de imágenes LANDSAT TM. Boletín de Geología. Vol. 27. No. 1. 84-94.