

**Evaluación del riesgo por movimientos en masa en el costado derecho de la vía Piedecuesta
– Mesa de los Santos, sector peaje La Punta**

Branner Alfonso Jurado Zambrano y María Fernanda Cortés Ramírez

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

Juan Camilo Jerez Gómez

Magíster en Geotecnia

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2023

Dedicatoria

A mis padres, quienes han sido mi apoyo inquebrantable a lo largo de este proceso. Sus enseñanzas y su incansable lucha por forjar en mí un carácter íntegro han sido fundamentales. Cada una de sus bendiciones diarias, sacrificios y apoyo constante han sido la clave de mi éxito.

A mi hermano, le dedico mi esfuerzo, ya que él es una de las razones por las que cada día me esfuerzo por ser un buen ejemplo en su vida.

A mis compañeros de trabajo de grado y amigos, María Fernanda Cortés e Iván Vecino, les agradezco profundamente por su inmenso esfuerzo, entusiasmo y dedicación en este proyecto.

Al Ing. Juan Camilo Jerez, mi profesor y director de trabajo de grado, le reconozco su apoyo, consejos y dedicación a lo largo de este proceso.

Gracias, sin ustedes no habría sido esto posible.

Brainner Alfonso Jurado Zambrano

Expreso mi más sincero agradecimiento hacia mi madre, Ofelia Ramírez, y mi padre, Uriel Cortés, así como hacia mis entrañables hermanos, Valentina Cortés y Andrés Cortés. Su apoyo inquebrantable y constante acompañamiento han sido los cimientos sobre los cuales he erigido mi carrera. En momentos en que pocos creían en mí, ellos se mantuvieron firmes.

Deseo reconocer a Gustavo Benavides por su apoyo emocional e incondicional en los momentos de mayor adversidad, su presencia ha sido mi mayor fortaleza en los momentos más difíciles de mi vida, muchas gracias por ser la luz que ilumina mis días.

Deseo expresar mi gratitud hacia mi profesor y director Juan Camilo Jerez, que con su enseñanza me ha guiado y orientado hacia la línea de ingeniería civil a la que me quiero enfocar, sus consejos y apoyo han sido un factor esencial en la culminación de este proyecto de grado.

No puedo dejar pasar la oportunidad de mencionar a mis adoradas mascotas, quienes han llenado mis días con felicidad y color, su compañía ha sido un bálsamo para el alma en cada etapa de mi formación.

A todas estas personas y seres especiales que han dejado su huella en mi camino, mi profundo reconocimiento por haber iluminado mi sendero con su presencia.

María Fernanda Cortés Ramírez

Agradecimientos

Al Geól. Javier Enrique Peña Manosalva, por su colaboración en el componente geológico del proyecto.

A nuestra compañera del semillero de investigación Geotecnia, Geología y Zonificación de Amenazas por Desastres Naturales, Nicolle Hernández, por su colaboración y ayuda en la etapa practica del proyecto de grado.

A nuestros compañeros y amigos, que estuvieron con nosotros desde un inicio en este proceso, por las risas y el estudio. Por las conversaciones inspiradoras, y por todos los momentos que compartimos juntos.

A nuestros profesores, que nos impulsaron a ser mejores cada día, por sus enseñanzas y consejos.

Gracias totales.

Contenido

Introducción	16
1. Evaluación del riesgo por movimientos en masa en el costado derecho de la vía Piedecuesta – Mesa de los Santos, sector peaje La Punta	17
1.1 Planteamiento del problema.....	17
1.2 Objetivos	19
1.2.1 Objetivo general	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
1.3 Justificación	19
2. Marco referencial	22
2.1 Marco teórico	22
2.1.1 Gestión del riesgo	22
2.1.2 Movimientos en masa	27
2.1.3 Escenarios de riesgo.....	28
2.1.4 Referencias de investigación.....	29
2.2 Marco conceptual	31
3. Metodología	32
3.1 Fase de recopilación de información (FASE 0)	33
3.2 Fase de campo (FASE 1)	33
3.3 Fase de laboratorio (FASE 2).....	33
3.4 Fase de interpretación (FASE 3)	34
3.5 Fase de generación de mapas (FASE 4).....	34
3.6 Fase de productos finales (FASE 5).....	34

4. Desarrollo.....	35
4.1 Análisis de información existente para el desarrollo geológico-geotécnico.....	35
4.1.1 Geografía.....	35
4.1.2 Análisis multitemporal.....	36
4.1.3 Antecedentes del proyecto	39
4.2 Modelo geológico – geotécnico	47
4.2.1 Laboratorios de suelos	47
4.2.2 Laboratorios de rocas.....	52
4.2.3 Perfil geológico – geotécnico.....	56
4.3 Evaluación del AVR	66
4.3.1 Diagnóstico del sector del peaje La Punta	66
4.3.2 Elaboración de mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo.....	79
4.3.3 Acciones de mitigación y prevención por movimientos en masa.....	98
5. Conclusiones	102
Referencias.....	104

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Ejemplos de criterios de especificación de escenarios de riesgo</i>	29
Tabla 2. <i>Coordenadas de las muestras</i>	47
Tabla 3. <i>Resultados de ensayo de humedad natural</i>	50
Tabla 4. <i>Compilación de resultados de laboratorios de suelo</i>	52
Tabla 5. <i>Tabla H.2.4-1 Factores de seguridad básicos mínimos directos.....</i>	60
Tabla 6. <i>Valores Aa y Av, Apéndice A-4</i>	60
Tabla 7. <i>Ángulo de fricción, peso unitario y cohesión del suelo y la roca del proyecto</i>	62
Tabla 8. <i>Factor de seguridad en cada método, primer corte, sin sismo.....</i>	62
Tabla 9. <i>Factor de seguridad en cada método, segundo corte, sin sismo</i>	63
Tabla 10. <i>Factor de seguridad en cada método, primer corte, con sismo.....</i>	63
Tabla 11. <i>Factor de seguridad en cada método, segundo corte, sismo</i>	64
Tabla 12. <i>Niveles de susceptibilidad en la zona de estudio</i>	64
Tabla 13. <i>Rangos de pendiente</i>	67
Tabla 14. <i>Temperatura máxima y mínima en la Mesa de Los Santos en todo un año.....</i>	75
Tabla 15. <i>Niveles de amenaza en la zona de estudio</i>	82
Tabla 16. <i>Tipificación de las estructuras alrededor en la zona de estudio</i>	88
Tabla 17. <i>Tipificación de las estructuras públicas</i>	88
Tabla 18. <i>Clasificación de la estructura mediante el tipo de edificación.....</i>	89
Tabla 19. <i>Clasificación de la estructura pública mediante el tipo de edificación.....</i>	89
Tabla 20. <i>Clasificación de vulnerabilidad física, evento de deslizamiento</i>	90
Tabla 21. <i>Clasificación de vulnerabilidad física en estructuras públicas</i>	90
Tabla 22. <i>Clasificación de vulnerabilidad física, evento de empujes laterales</i>	91

Tabla 23. <i>Niveles de vulnerabilidad en la zona de estudio.....</i>	93
Tabla 24. <i>Índice de riesgo por deslizamientos para estructuras</i>	94
Tabla 25. <i>Índice de riesgo por deslizamientos para estructuras públicas.....</i>	94
Tabla 26. <i>Índice de riesgo por presiones laterales para estructuras</i>	95
Tabla 27. <i>Clasificación del índice de riesgo.....</i>	95
Tabla 28. <i>Niveles de riesgo en la zona de estudio</i>	97

Lista de figuras

Figura 1. <i>Ejemplo de amenaza por fenómenos atmosféricos, incendio ubicado en el valle interandino del Río Magdalena</i>	25
Figura 2. <i>Ejemplo de amenaza por sismo, falla de Bucaramanga</i>	25
Figura 3. <i>Ejemplo de amenaza por fenómeno hidrológico, desbordamiento del río Carare en Puerto Araujo, Cimitarra.....</i>	26
Figura 4. <i>Ejemplo de amenaza por fenómeno volcánico, Caída de ceniza del volcán Nevado del Ruiz</i>	26
Figura 5. <i>Principales tipos de movimientos en masa.....</i>	28
Figura 6. <i>Mapa de delimitación geográfica veredal de la zona de estudio.....</i>	35
Figura 7. <i>Delimitación de zonas para análisis multitemporal.....</i>	36
Figura 8. <i>Fotografías satelitales para análisis multitemporal</i>	37
Figura 9. <i>Mapa de diagnóstico rural - PBOT Piedecuesta</i>	40
Figura 10. <i>Mapa del uso potencial del suelo rural - PBOT Piedecuesta</i>	40
Figura 11. <i>Mapa de clasificación del suelo rural - PBOT Piedecuesta</i>	41
Figura 12. <i>Mapa de formulación rural - PBOT Piedecuesta</i>	42
Figura 13. <i>Mapa geológico – SGC</i>	42
Figura 14. <i>Avalancha en el sector de Los Curos el 29/05/2018.....</i>	44
Figura 15. <i>Deslizamiento del 26-02-2020 en la vía Piedecuesta-Mesa de Los Santos</i>	44
Figura 16. <i>Deslizamiento de rocas vía Piedecuesta-Mesa de Los Santos 27-02-2020</i>	45
Figura 17. <i>Derrumbe del 01-03-2022 y 04-04-2022 en la vía Piedecuesta-Mesa de Los Santos</i>	45
Figura 18. <i>Movimiento en masa en la vía Piedecuesta-Mesa de los Santos 21-09-2022.....</i>	46
Figura 19. <i>Deslizamiento de 16-04-2023 en la vía Piedecuesta-Mesa de Los Santos</i>	46

Figura 20. <i>Recolección de muestras</i>	47
Figura 21. <i>Preparación de muestras</i>	48
Figura 22. <i>Lavado de las muestras</i>	48
Figura 23. <i>Secado de muestras</i>	49
Figura 24. <i>Ensayo de humedad natural</i>	49
Figura 25. <i>Ensayo de granulometría</i>	50
Figura 26. <i>Análisis granulométrico</i>	51
Figura 27. <i>Ensayo de límites de Atterberg</i>	52
Figura 28. <i>Muestras de rocas</i>	53
Figura 29. <i>Cemento y poros de los fragmentos de rocas en el sector del peaje de La Punta</i>	54
Figura 30. <i>Clasificación textural, armazón de la roca en el sector del peaje La punta</i>	55
Figura 31. <i>Clasificación textural, matriz de la roca en el sector del peaje La punta</i>	55
Figura 32. <i>Clasificación composicional, armazón de la roca en el sector del peaje de La Punta</i>	56
Figura 33. <i>Curvas de nivel con mapa aéreo de referencia</i>	57
Figura 34. <i>Corte 1 del terreno, Civil3D</i>	58
Figura 35. <i>Corte 2 de terreno, Civil3D</i>	58
Figura 36. <i>Corte 1 del terreno, AutoCAD</i>	59
Figura 37. <i>Corte 2 del terreno, AutoCAD</i>	59
Figura 38. <i>Factor de seguridad, primer corte, sin sismo</i>	62
Figura 39. <i>Factor de seguridad, segundo corte, sin sismo</i>	63
Figura 40. <i>Factor de seguridad, primer corte, con sismo</i>	63
Figura 41. <i>Factor de seguridad, segundo corte, con sismo</i>	64

Figura 42. <i>Mapa de susceptibilidad de amenazas por remoción en masa de la zona de estudio</i>	65
Figura 43. <i>Mapa de amenazas naturales según el PBOT de Piedecuesta de la zona de estudio</i>	66
Figura 44. <i>Mapa de elevaciones de la zona de estudio</i>	67
Figura 45. <i>Mapa de pendientes de la zona de estudio</i>	68
Figura 46. <i>Fisiografía zona 1, sector peaje La Punta</i>	69
Figura 47. <i>Fisiografía zona 2, sector peaje La Punta</i>	69
Figura 48. <i>Fisiografía zona 3, sector peaje La Punta</i>	69
Figura 49. <i>Fisiografía zona 4, sector peaje La Punta</i>	70
Figura 50. <i>Mapa geológico de la zona de estudio</i>	71
Figura 51. <i>Mapa geomorfológico de la zona de estudio</i>	72
Figura 52. <i>Mapa de uso potencial del suelo según PBOT Piedecuesta de la zona de estudio....</i>	74
Figura 53. <i>Clima promedio en la mesa de los santos en todo un año</i>	74
Figura 54. <i>Cobertura de las nubes en la Mesa de Los Santos.....</i>	75
Figura 55. <i>Precipitación en la Mesa de Los Santos en el año.....</i>	76
Figura 56. <i>Humedad en la Mesa de Los Santos durante un año promedio</i>	77
Figura 57. <i>Afluentes alrededor de la Mesa de Los Santos.....</i>	78
Figura 58. <i>Procedimiento para la elaboración del mapa de amenazas por remoción en masa .</i>	80
Figura 59. <i>Mapa de amenazas por remoción en masa de la zona de estudio</i>	81
Figura 60. <i>Procedimiento para la elaboración del mapa de vulnerabilidad</i>	82
Figura 61. <i>Nomenclatura de estructuras para análisis de vulnerabilidad</i>	83
Figura 62. <i>Estructura E-1</i>	84
Figura 63. <i>Estructura E-2</i>	84
Figura 64. <i>Estructura E-3</i>	84

Figura 65. <i>Estructura E-4</i>	85
Figura 66. <i>Estructura E-5</i>	85
Figura 67. <i>Estructura E-6</i>	85
Figura 68. <i>Estructura E-7</i>	86
Figura 69. <i>Estructura E-8 y E-9</i>	86
Figura 70. <i>Estructura E-10</i>	86
Figura 71. <i>Estructura pública EP-1, carretera</i>	87
Figura 72. <i>Estructura pública EP-2, drenajes</i>	87
Figura 73. <i>Mapa de vulnerabilidades por remoción en masa en la zona de estudio</i>	93
Figura 74. <i>Procedimiento para la elaboración del mapa de riesgos por remoción en masa</i>	96
Figura 75. <i>Mapa de riesgos por remoción en masa en la zona de estudio</i>	98
Figura 76. <i>Berma o banquetta en vías</i>	99
Figura 77. <i>Trincheras en taludes</i>	100
Figura 78. <i>Malla para retención de bloques en taludes</i>	100
Figura 79. <i>Mallas ancladas en taludes</i>	101
Figura 80. <i>Mallas alcancía en taludes</i>	101
Figura 81. <i>Cubiertas de protección en taludes</i>	102

Lista de apéndices

(Ver documentos externos)

Apéndice A. *Resultados de laboratorio de suelos.*

Apéndice B. *Resultados de laboratorio de rocas.*

Apéndice C. *Mapa veredal.*

Apéndice D. *Mapa de susceptibilidad.*

Apéndice E. *Mapa de elevaciones.*

Apéndice F. *Mapa de pendientes.*

Apéndice G. *Mapa geológico.*

Apéndice H. *Mapa geomorfológico.*

Apéndice I. *Mapa de amenazas naturales.*

Apéndice J. *Mapa de amenazas por remoción en masa.*

Apéndice K. *Mapa de vulnerabilidades por remoción en masa.*

Apéndice L. *Mapa de riesgos por remoción en masa.*

Apéndice M. *Mapa de uso del suelo.*

Resumen

La evaluación de movimiento en masa analiza deslizamientos y eventos similares en terrenos de altas pendientes, evalúa la amenaza y vulnerabilidad para calcular el riesgo siendo la probabilidad de daños. Para prevenir pérdidas el Sistema Nacional de Gestión de Desastres, propone tres etapas: reconocimiento del riesgo, reducción del riesgo y el manejo de desastres. Para este proyecto, ubicado en el sector Peaje La punta, entre Piedecuesta y La mesa de Los santos, se realizó su debida evaluación de movimiento en masa donde se hizo mayor énfasis en la primera fase siendo la de reconocimiento del riesgo, se tomaron muestras de suelo y roca las cuales se estudiaron en el laboratorio dando como resultado un suelo areno limoso (SM) con alto contenido orgánico y roca detrítica. Ya teniendo información geológica de la zona, se realizó el análisis de riesgo, que, para llegar a este, primero se determinó la amenaza del área de estudio dando como resultado una amenaza alta debido a las pendientes mayores de 57% que según la resolución 1294 de las normas de la CDMB, aplica para una amenaza alta; para evaluar la vulnerabilidad se realizó un análisis cualitativo mediante la metodología de Leone, el cual plantea que debe realizar una calificación de edificaciones por observación de campo, categorizándolas según su calidad y características estructurales dando como resultado índices de vulnerabilidad medios y bajos. Se modelaron los taludes en SLIDE, donde los factores de seguridad cumplían con los de la norma NSR-10. Para hallar el índice de riesgo se multiplicó el índice de riesgo y la probabilidad de falla proporcionada por el SLIDE, indicando un riesgo de 0% para las estructuras, sin embargo, en evidencia de que han ocurrido eventos en el sector, el riesgo es existente categorizándose mediante un mapa los riesgos bajos, medios, altos mitigables y no mitigables.

Palabras clave: amenaza, riesgo, vulnerabilidad, movimientos en masa, Mesa de Los Santos

Abstract

Mass movement assessment analyzes landslides and similar events in high-slope terrains, evaluates the threat and vulnerability to calculate risk as the likelihood of damage. To prevent losses, the National Disaster Management System proposes three stages: risk recognition, risk reduction, and disaster management. For this project located in the Peaje La Punta sector, between Piedecuesta and La Mesa de Los Santos, a thorough mass movement assessment was conducted, with a primary emphasis on the first phase of risk recognition. Soil and rock samples were taken and studied in the laboratory, revealing sandy silt (SM) soil with high organic content and detrital rock. With geological information in hand, a risk analysis was performed. To achieve this, the threat in the study area was first determined, resulting in a high threat due to slopes exceeding 57%, as specified by Resolution 1294 of the CDMB norms, which designates slopes greater than this as a high threat. To assess vulnerability, a qualitative analysis was conducted using the Leone methodology, involving field-based building assessments and categorization based on quality and structural characteristics, yielding moderate and low vulnerability indices. Slopes were modeled using SLIDE, meeting safety factors outlined by the NSR-10 standard.

To calculate the risk index, the risk index was multiplied by the failure probability provided by SLIDE, yielding a 0% risk for structures. However, considering past events in the sector, there remains existing risk categorized on a map as low, medium, high, mitigable, and non-mitigable risks.

Keywords: threat, risk, vulnerability, mass movements, Mesa de Los Santos

Introducción

En un contexto donde los movimientos en masa representan una amenaza creciente para comunidades e infraestructura, surge el proyecto "Evaluación del riesgo por movimientos en masa en el costado derecho de la vía Piedecuesta – Mesa de los Santos, sector peaje La Punta". Esta iniciativa busca abordar los riesgos geológicos y geotécnicos en esta área crítica.

La vía Piedecuesta – Mesa de los Santos, particularmente el sector peaje La Punta, enfrenta desafíos por movimientos en masa debido a procesos naturales y cambios climáticos. Estos eventos han generado cierres viales y amenazas a la seguridad de la población. Urbanización y actividades agrícolas han exacerbado los riesgos. No obstante, la información y evaluación integral de riesgos en la región son insuficientes. El proyecto se justifica por la urgencia de evaluar y mitigar riesgos para prevenir pérdidas humanas y materiales. Su objetivo es evaluar el riesgo por movimientos en masa en el costado derecho de la vía Piedecuesta – Mesa de los Santos, sector peaje La Punta. Para ello, se establecen objetivos como la recopilación de información existente, definición de un modelo geológico-geotécnico y la evaluación completa de amenazas, vulnerabilidades y riesgos.

La metodología se basa en la propuesta del Servicio Geológico Colombiano. Se desarrollarán cinco fases, incluyendo análisis multitemporales, recolección y análisis de muestras, y modelamiento de taludes. Los resultados permitirán identificar zonas con amenazas geológicas y geotécnicas.

La investigación se estructura en tres etapas: análisis de información existente, construcción de un modelo geológico-geotécnico y evaluación integral de riesgos. Esta investigación aspira a aportar al conocimiento científico y brindar herramientas para la gestión del riesgo por movimientos en masa en la región, en ayuda de la seguridad y bienestar de la población.

1. Evaluación del riesgo por movimientos en masa en el costado derecho de la vía

Piedecuesta – Mesa de los Santos, sector peaje La Punta

1.1 Planteamiento del problema

Para Colombia y América Latina es fundamental avanzar respecto a la captación de toda la información relevante sobre eventos catastróficos o desastres naturales como se les conoce últimamente; dentro de los desastres naturales se resaltan aquellos asociados con el origen geológico y geotécnico (derrumbes, inundaciones, caídas, entre otros) que constantemente ponen en riesgo muchas vidas humanas y los sectores agrícolas – ganaderos entre otros.

Los desastres naturales de origen geológico y geotécnico son sucesos catastróficos, consecuencia de las modificaciones naturales y artificiales sobre el relieve de nuestro planeta tierra, como contextos geográficos se pueden mencionar laderas, taludes, túneles, cortes, montículos, entre otros; donde los factores como el agua, viento, influencia de seres vivos (biológico) modifican constantemente las condiciones actuales de los materiales (respuesta físico-química), causando alteraciones en todo el sistema y provocando en la superficie terrestre la búsqueda de una nueva estabilidad (movimiento). Entre el 2010 y 2020 se han presentado 37 eventos de este tipo en el país, según lo registrado en las bases de datos de fuentes nacionales como SIMMA, UNGRD, DESINVENTAR, CNMM. En Colombia se han registrado varias situaciones por eventos de remoción en masa, donde uno de los departamentos que más destaca ha sido el de Santander, donde se han presentado 785 eventos en los últimos 100 años ocasionando una alta incidencia en el número de personas y familias afectadas, como también afectaciones en la propiedad pública y privada, generando alteraciones en los sistemas de vida productivos; como, daños y obstrucciones en la infraestructura vial [1]. Los desastres naturales y en especial los

movimientos en masa desencadenados por una alta sismicidad o precipitación pueden ocasionar grandes tragedias, como lo sucedido en el municipio de Arboledas en el departamento de Norte de Santander, el pasado 30 de junio del 2022, en donde un deslizamiento arrasó con la vivienda de una familia dejando dos personas gravemente heridas y cuatro de ellas fallecieron según lo informado por el Tiempo.

A lo largo de los últimos años en un sector de la vía Piedecuesta – Los Santos, cerca al Peaje La Punta, en diferentes épocas del año se ha podido observar cómo los procesos geológicos activos como la meteorización, erosión en los taludes de la vía y los cambios en las condiciones climáticas que se presentan en esta región, sumado al uso que se le ha dado al suelo desde el punto de vista de cultivos, agricultura y deforestación, han ido modificando las condiciones del terreno, generando así, un aumento en la probabilidad de desastres de tipo geológico, condicionando de esta manera el terreno para que se desplace o genere procesos de remoción en masa deteriorando e inestabilizando las laderas de cultivos y desarrollo del sector. Los cierres en las vías por lo general son parciales, pero debido a la constante pérdida de material se podría dimensionar un evento con mayor afectación en el sector así como los datos arrojados por las fuentes nacionales o como los más recientes sucesos ocurridos en la vía Piedecuesta – Mesa de Los Santos; siendo el primero, el pasado 1 de marzo del 2022 por fuertes lluvias causaron deslizamientos por fenómenos de remoción en masa y desprendimiento de rocas en cuatro puntos del sector que comprende el Bwey hasta el peaje La Punta, según lo registrado en el informe de Vanguardia. El segundo suceso presentado recientemente, fue el 4 de abril del 2022, en donde se presentaron cuatro derrumbes en la vía a la Mesa de los Santos debido a las fuertes lluvias presentadas al inicio del mes; generando afectaciones en la movilidad en el sector de la Cueva La Pizca según se informó por el canal de Caracol Radio Bucaramanga. Estos eventos naturales afectan a las comunidades cercanas tanto en

movilidad como la integridad física dependiendo de la magnitud con la que se presente el movimiento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el riesgo por movimientos en masa del costado derecho de la vía Piedecuesta – Mesa de los santos, sector peaje La Punta.

1.2.2 Objetivos específicos

- Recolectar información de estudios existentes en el área del proyecto, con el fin de obtener información secundaria, que sirva como insumo a los análisis geológico-geotécnicos a realizarse.
- Definir el modelo geológico-geotécnico presente en la zona de estudio, mediante la realización de ensayos de campo y de laboratorio que permitan la caracterización de los materiales de suelo y roca.
- Determinar la amenaza, vulnerabilidad y riesgo del sector de estudio, siguiendo la metodología propuesta por el servicio geológico colombiano para este tipo de estudios.

1.3 Justificación

Partiendo de la necesidad de evaluar los riesgos que se puedan presentar con respecto a los procesos geológicos activos existentes en el sector de estudio como lo son, la meteorización, erosión, cambios climáticos, entre otros; y por los cambios del uso del suelo por deforestación y

actividades agrícolas como los cultivos; que en consecuencia ocasionan deslizamientos en remoción en masa, desprendimiento de rocas, afectaciones en la movilidad vehicular y bienestar de los turistas y habitantes de la zona, resulta pertinente establecer las características actuales del sector, evaluar el riesgo mediante procesos geológicos y geotécnicos de los cuales se hará evidencia a través de mapeos que contengan información de los riesgos y amenazas en el sector de estudio, esto a fin de que puedan surgir alternativas que permitan mitigarlos y retardar procesos presentes del deterioro de rocas y suelos. Una vez recopilada la información es importante resaltar la utilidad para el manejo de recursos y la comunicación entre los municipios de Piedecuesta y Los Santos, mencionando al mismo tiempo, el desarrollo turístico de la región para la comunidad local, nacional e internacional.

De esta manera, para la “Metodología del Conocimiento de Riesgo para Diferentes Escenarios Amenazantes en Santander” propuesta por la Dirección de Gestión del Riesgo de Santander, ofrece a los municipios la oportunidad invaluable para mejorar su capacidad de respuesta al riesgo, familiarizándose con el proceso de desarrollo de estudios de amenazas vulnerabilidad y riesgo. Se considera un aporte esencial el cual en un lapso de tiempo que varía desde el 2000 al 2022, partiendo de los estudios del sector que hacen referencia a estas temáticas y enfocado en entender la importancia de los procesos activos de origen geológico – geotécnico para poder mapear las amenazas, vulnerabilidades y riesgos existentes en la zona de estudio como base para la proposición de alternativas que puedan evitar y mitigar los efectos desestabilizadores que se presentan.

Con la finalidad de evaluar el estado actual de los procesos de remoción en masa que se han presentado en los últimos años en el sector de la vía Piedecuesta - Mesa de Los Santos, peaje La Punta, hay que tener en cuenta unos parámetros y criterios dados por la literatura, como

referentes con el fin de poder dar cumplimiento con lo establecido en el desarrollo del proyecto; inicialmente el marco de la Política de Gestión Ambiental Urbana, donde el objetivo de la Gestión del Riesgo en las áreas urbanas es identificar, prevenir y mitigar amenazas y vulnerabilidades a través de la gestión integral del riesgo.

El MinAmbiente dentro del informe de gestión al congreso del 2012, en el marco de la Política de Gestión Ambiental Urbana (PGAU), inició el proceso de fortalecimiento a las autoridades ambientales en aspectos relacionados con la gestión del riesgo en áreas urbanas. En este sentido, durante el año 2014 se dio continuidad al fortalecimiento de las autoridades ambientales en la identificación del riesgo por desastres de origen natural, socio natural y antrópico en áreas urbanas, definiendo criterios de diagnóstico en estos aspectos, e incluyendo aspectos técnicos, normativos e institucionales.

Para el Área Metropolitana de Bucaramanga es esencial identificar en qué condiciones se encuentran todas las laderas o taludes y cuál es la posibilidad de presentarse eventos de origen geológico – geotécnico relacionados con el debilitamiento de materiales y pérdida o riesgo de afectación sobre cultivos o vidas.

Como un primer acercamiento se tendrá que establecer las características del eventual riesgo geotécnico sobre el sector de la Mesa de Los Santos ya que es fundamental al momento de evaluar las condiciones geotécnicas, la previa definición de variables y la categorización de estas basándose en los puntos y la política anteriormente mencionados; definiendo de esta forma variables y categorizarlas por zonas de mayor y menor riesgo en estos eventos, por tal motivo, la integración de los factores geológicos – geotécnicos del sector de la Mesa de Los Santos, se ejecuta un primer acercamiento para conocer las propiedades y características geotécnicas, así mismo, conseguir adaptar la metodología presentada por el Servicio Geológico Colombiano en el 2017 a

una escala de mayor detalle, que serviría posteriormente en estudios de evaluación del riesgo geotécnico en otras zonas de interés; finalizando con la delimitación de estas zonas las cuales están representadas en mapas que serán base para futuras soluciones en áreas similares, así este enfoque no solo ayuda en la Mesa de los Santos, sino también en otras regiones geográficas con problemáticas parecidas.

2. Marco referencial

2.1 Marco teórico

2.1.1 Gestión del riesgo

Según la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y de acuerdo a la Ley 1523 de 2012, la gestión del riesgo de desastres es un proceso social enfocado formular, ejecutar, monitorear y evaluar políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes, con el propósito primordial de comprender y minimizar la vulnerabilidad, además de manejar los eventos catastróficos, promoviendo la seguridad, bienestar y calidad de vida de las personas, todo ello en línea con el desarrollo sostenible. Para lograrlo, las autoridades deben implementar procesos de gestión de riesgo, mientras que los habitantes del territorio colombiano deben actuar con precaución, solidaridad y autoprotección [2].

El riesgo de desastres se deriva de procesos de uso y ocupación insostenible del territorio, por tanto, la explotación racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente

constituyen características irreductibles de sostenibilidad ambiental y contribuyen a la gestión desastres.

Según el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD), la gestión de este se basa en tres procesos:

Conocimiento del Riesgo: Es el proceso compuesto por la identificación de escenarios, análisis y evaluación, monitoreo y el seguimiento junto a sus componentes y la comunicación para promover una mayor conciencia de este, que alimenta los procesos de reducción del riesgo y de manejo de desastre.

Reducción del Riesgo: Esta parte del proceso se compone por la intervención dirigida a modificar o disminuir las condiciones de riesgo existentes, mitigándolo y evitando uno nuevo, con el fin de reducir la amenaza, la exposición y disminuir la vulnerabilidad de las personas, los medios de subsistencia, los bienes, la infraestructura y los recursos ambientales, para evitar o minimizar los daños y pérdidas en caso de producirse los eventos físicos peligrosos. Su reducción implica su intervención correctiva de un riesgo existente y prospectiva de uno nuevo, incluyendo su la protección financiera.

Manejo del Desastre: Compuesto por la preparación para la respuesta a emergencias, la preparación para la recuperación Post-desastre, la ejecución de dicha respuesta y la ejecución de la respectiva recuperación, entiéndase: rehabilitación y recuperación.

El riesgo corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural, tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad [2, p.1].

2.1.1.1 Análisis de riesgo. Según MinAmbiente, se plantea a partir de la ley 1523 del año 2012 que “El riesgo se entiende como los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad” [2].

2.1.1.1.1 Amenaza. Las amenazas pueden ser de origen natural, socio natural o antrópico [3]. Las naturales, están asociadas a fenómenos naturales como la erosión costera, tsunamis, terremotos o huracanes; las de origen socio natural están relacionadas con la presencia fenómenos físicos con procesos de degradación o transformación ambiental y/o de intervención humana en los ecosistemas, ejemplo las inundaciones por afectación de las coberturas vegetales de las cuencas. Por su parte, las antrópicas son las que han sido generadas por la actividad humana en la producción, distribución, transporte y consumo de bienes y servicios y en la construcción y uso de infraestructura y edificios.

Escenarios de amenazas: según el libro “Desastres, Planificación y Desarrollo: Manejo de Amenazas Naturales para Reducir los Daños” [4, pp. 25-26] resalta varios fenómenos naturales potencialmente peligrosos siendo:

- *Fenómenos atmosféricos:* Granizo, huracanes, incendios (matorrales, bosques, pastizales, sabanas), tornados y tormentas tropicales.

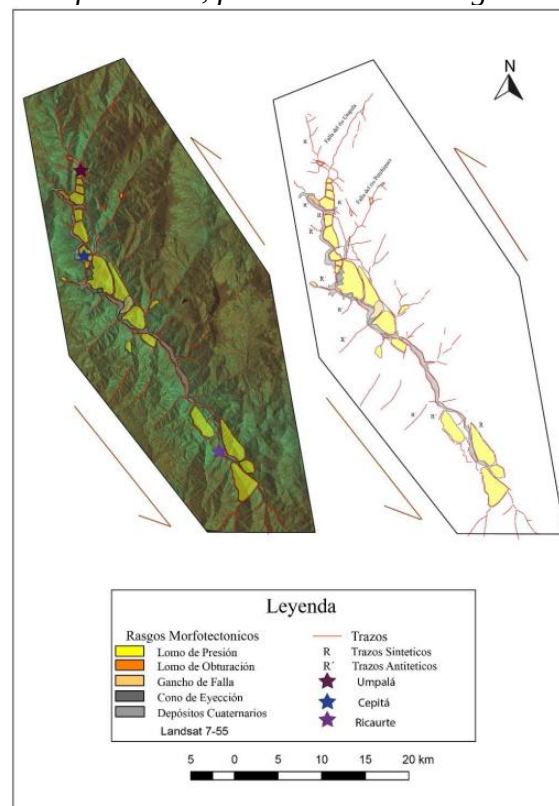
Figura 1. Ejemplo de amenaza por fenómenos atmosféricos, incendio ubicado en el valle interandino del Río Magdalena



Adaptado de [5].

- Sísmicos: Fallas, temblores, dispersiones laterales, licuefacción, Tsunamis y Seiches.

Figura 2. Ejemplo de amenaza por sismo, falla de Bucaramanga



Tomado de [6].

- *Hidrológicos:* Inundación costera, desertificación, salinización, sequía, erosión y sedimentación, desbordamiento de ríos y olas ciclónicas.

Figura 3. *Ejemplo de amenaza por fenómeno hidrológico, desbordamiento del río Carare en Puerto Araujo, Cimitarra*



Tomado de [7].

- *Volcánicos:* Tefra (cenizas, lapilli), gases, flujos de lava, corrientes de fango, proyectiles y explosiones laterales y flujos piroclásticos.

Figura 4. *Ejemplo de amenaza por fenómeno volcánico, Caída de ceniza del volcán Nevado del Ruiz*



Adaptado de [8].

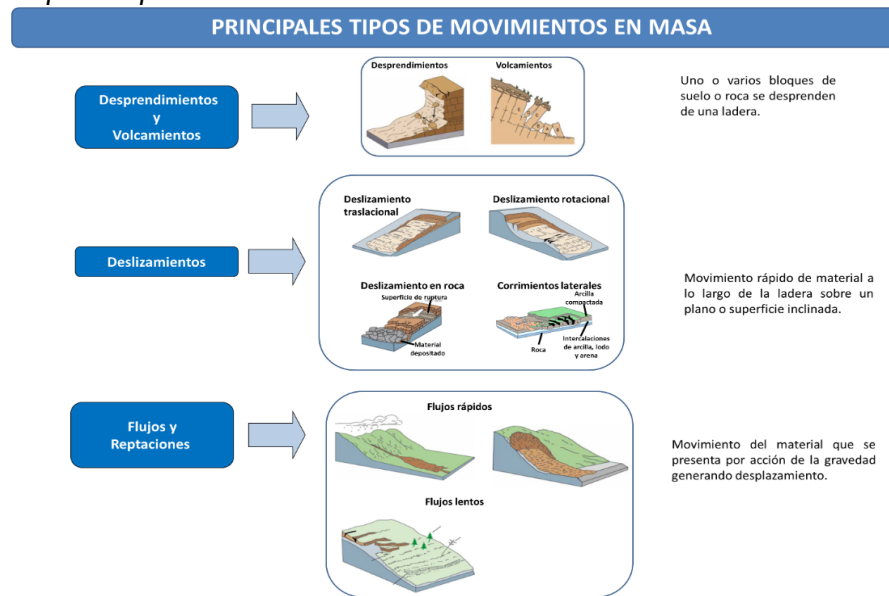
2.1.1.1.2 Vulnerabilidad. La vulnerabilidad la susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos [3].

Escenarios de vulnerabilidad: según la Guía Municipal para la gestión del riesgo, propone 3 principales situaciones que contribuyen a la vulnerabilidad [9, p. 24], siendo:

- *Física:* Cuando existe la posibilidad de perder algún bien o pertenencia debido a algún fenómeno amenazante, por ejemplo, las edificaciones resistentes a los sismos.
- *Ambiental:* Cuando predominan pérdidas en recursos ambientales, por ejemplo, cuando se seca una fuente hídrica.
- *Económica:* Cuando hay baja capacidad emprendedora, según la guía, cuando hay pobreza y miseria, por ejemplo, el desempleo.

2.1.2 Movimientos en masa

Según el Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático “*Un movimiento en masa es el proceso por el cual un volumen de material constituido por roca, suelo, tierras, detritos o escombros, se desplaza ladera abajo por acción de la gravedad*”. Estos términos son coloquialmente llamados como deslizamientos, derrumbes, procesos y fenómenos de remoción en masa falla de taludes y laderas [10]. Teniendo en cuenta lo anterior, en la Figura 1 se identifican los principales tipos de movimientos en masa:

Figura 5. Principales tipos de movimientos en masa

Adaptado de [10].

Existen diversas causas que accionan los movimientos en masa, siendo factores naturales los cuales son por temas de clima (lluvias internas y prolongadas, actividad sísmica, erosión del suelo y por acción del agua) y por las condiciones de terreno (pendientes altas, material débil, fallas geológicas y cobertura vegetal) y los factores por acción humana cuando los movimientos en masa son producidos por procesos artificiales (cortes, excavación, rellenos y sobre cargas de laderas, modificación de drenajes naturales, falta de drenajes urbanos y actividad minera), siendo los factores detonantes que podrían poner en riesgo a una civilización o parte de ella [10].

2.1.3 Escenarios de riesgo

Los escenarios de riesgos son aquellos fragmentos o campos delimitados de las condiciones de riesgo de una zona; al identificar los riesgos se puede determinar la información necesaria con el fin de priorizar cuáles de estos escenarios son los que más tienen relevancia [4], siendo así, la Guía Municipal para la Gestión del Riesgo plantea los siguientes ejemplos:

Tabla 1. *Ejemplos de criterios de especificación de escenarios de riesgo*

Criterio de especificación de escenarios	Ejemplos de escenarios de riesgo
Fenómenos de amenazas	Inundaciones, sismos e incendios estructurales
Elementos o bienes expuestos	Puentes, cultivos, población y viviendas
Tipo de daños	Heridos, trauma psicológico y contaminación de ecosistemas
Grupo social	Menores de edad, adultos mayores y mujeres cabeza de familia
Actividades económicas	Minería, transporte e industria química
Actividades sociales	Corralejas y peregrinaciones multitudinarias
Operaciones de grandes obras	Embalses, líneas de flujo de hidrocarburos y túneles

Adaptado de [9, p. 36].

2.1.4 Referencias de investigación

El movimiento en masa en taludes representa un riesgo significativo para las comunidades afectando infraestructura del área de estudio como hogares y tiendas causando daños a tal punto de poner en vulnerabilidad a los habitantes de la zona, así mismo también las vías pueden verse afectadas ya que interfiere con la comunicación entre ciudades. En el Peaje La Punta, ha ocurrido este tipo de eventos como el desprendimiento de material, siendo los siguientes los más recientes:

Caracterización estática y dinámica del suelo (caso de estudio cabecera del municipio Los Santos): Se desarrolló el estudio debido a los métodos no destructivos de exploración realizados en un campo de medición de la región de la Mesa de Los Santos teniendo en cuenta parámetros geofísicos los cuales se implementaron para desarrollar técnicas de refracción sísmica y tomografía eléctrica, al igual que la toma de variables in-situ que fueron analizados posteriormente en el laboratorio, de tal forma que todos estos resultados se analizaron y se realizaron pruebas complementarios con el MASW, para ejecutar todos estos y trabajar de forma conjunta con los

datos del SPT y los datos obtenidos de la prueba geofísica, sin embargo se adiciona un estudio de propiedades elásticas con estos mismos datos donde se concluye que el suelo tiene buenas características y se puede encontrar que los componentes del mismo son poco deformables lo que no va a generar problemas de asentamientos a futuro, de igual forma se expresa que son muy pocos los estudios de análisis geofísicos que se realizan en la zona [11].

Análisis de modelos de deslizamiento en bloque para predecir el comportamiento dinámico del fenómeno de remoción en masa. Modelo Uniparamétrico y Modelo Biparamétrico: El desarrollo de este mismo se realiza con el fin de comparar el trabajo de dos modelos de deslizamiento en bloque donde se determinan propiedades tales como alcance, velocidad aceleración de la masa y analizando parámetros como el ángulo de fricción, la turbulencia y el coeficiente de presión en poros, con el fin de analizar la variación y afectación de los movimientos de masa y fenómenos naturales de este suelo en la zona de estudio [12].

Análisis y evaluación del escenario de riesgo por movimientos en masa en la localidad de Rafael Uribe, Bogotá D. Se realizó un estudio en la localidad Rafael Uribe Uribe de Bogotá, Colombia, para evaluar el riesgo por movimientos en masa. Se siguieron directrices del Servicio Geológico Colombiano. Se generaron mapas detallados de zonas de alta y media amenaza, revelando 123.2 ha de alta amenaza, 461.3 ha de amenaza media y 236.3 ha de baja amenaza. Se identificaron 1,024 elementos expuestos en zonas de alta amenaza y algunas de amenaza media, incluyendo edificaciones residenciales y comerciales. Se calculó la fragilidad y la intensidad para evaluar la vulnerabilidad en escenarios de movimientos en masa lentos y rápidos, identificando áreas vulnerables como La Paz, La Picota Oriental, etc. Se aplicó el modelo de Presión y Liberación para analizar causas subyacentes como urbanizaciones ilegales y debilidades en políticas de ocupación. Se calculó el riesgo, destacando áreas de alto riesgo como Arrayanes. Se

propusieron medidas de mitigación, como optimización del alcantarillado y concienciación comunitaria en comprensión del riesgo y cambio climático [13].

Análisis del fracturamiento presente en la Formación Los Santos al Noreste y Centro de la Mesa de Los Santos, Departamento de Santander. En el siguiente estudio se ostenta una evaluación hidrogeológica preliminar de las formaciones litoestratigráficas que afloran en La Mesa de Los Santos en base a la cartografía geológica e inventario de puntos de agua, complementando esto con el análisis de la porosidad primaria por medio de estudios petrográficos y su porosidad secundaria ya que esta se relaciona estadísticamente con la cantidad de fracturas de formación, su apertura y su buzamiento [14].

2.2 Marco conceptual

Zonificación: Indica la división de un área geográfica en sectores homogéneos conforme a ciertos criterios. Es la clasificación de usos que se realiza dentro de las unidades territoriales en un distrito de manejo integrado de los mismos, conforme a un análisis previo de sus aptitudes, características y cualidades abióticas, bióticas y antrópicas [15].

Mitigación: Conjunto de acciones y medidas, estructurales o no-estructurales, dirigidas a “reducir” las condiciones de vulnerabilidad o la exposición a las amenazas de las comunidades y su infraestructura. Normalmente se acostumbra a implementar acciones estructurales que disminuyen el impacto del evento, y por ende disminuir los daños [16, p. 1].

Gestión del riesgo: Se define como el proceso de identificar, analizar y cuantificar las probabilidades de pérdidas y efectos secundarios que se desprenden de los desastres, así como de las acciones preventivas, correctivas y reductivas correspondientes que deben emprenderse [17, p. 5].

Amenaza: Se entiende como un peligro que está latente, que todavía no se desencadenó, pero que sirve como aviso para prevenir o para presentar la posibilidad de que sí lo haga. [18, párr 1-2].

Fenómenos naturales: Son cambios producidos en la naturaleza. Se considera que los fenómenos naturales se tornan más extremos con el paso del tiempo [19, párr 1].

Vulnerabilidad: Es la incapacidad de resistencia cuando se presenta un fenómeno amenazante, o la incapacidad para reponerse después de que ha ocurrido un desastre [20, p. 8].

Montículos: Pequeña elevación del terreno, generalmente aislada, obra de la naturaleza o de la mano del hombre [21, párr 4].

Post-desastre: Proceso orientado a reinsertar a la población, en su dinámica social, cultural y económica después de la ocurrencia del desastre [22, párr 1].

Sub-urbanización: Se conoce como los espacios geográficos ubicados a las afueras de la ciudad (suburbios urbanos) [23, párr 1].

3. Metodología

Para la metodología del proyecto se tomó como referencia la “guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000” del Servicio Geológico Colombiano, esto con el fin de evaluar las amenazas de origen geológico – geotécnico [24], para lograr los objetivos del proyecto se plantearon 5 fases, partiendo de un análisis multitemporal realizado por imágenes satelitales encontradas en el software Google Earth, dando información al proyecto desde el año 2000 hasta el 2022 del área de influencia a trabajar con el fin de analizar variaciones que el terreno ha presentado con el paso de los años, a su vez se realizaron mapas de

la zona mediante el software ArcGIS y modelamiento de taludes con el software Slide y así se determinaron las zonas vulnerables y el factor de seguridad del talud del Peaje La punta.

3.1 Fase de recopilación de información (FASE 0)

Durante esta fase, los investigadores se encargaron de buscar información relevante para el estudio del área de la Mesa de Los Santos, como lo es el tipo de suelo que presentó el sector, la cantidad anual de lluvia, el nivel de sismicidad del sector, información de entidades regionales y locales, logrando de esta manera un conocimiento previo sobre el sector y la organización de características fundamentales para entender mejor los procesos que se pueden encontrar durante la fase de campo y para mantenerse actualizado en cuestión de avances y modificaciones de las variables y las condiciones del terreno.

3.2 Fase de campo (FASE 1)

Se realizó la extracción de una cantidad necesaria de muestras de suelo y roca de la zona a estudiar, las cuales mediante un análisis de laboratorio permitieron la obtención de información sobre las condiciones actuales que podría tener el terreno siendo esta información el enfoque de esta fase, este proceso se realizó apoyado de las normas de embalaje y los criterios para la recolección de cada una de las muestras (condición actual, tamaño, componentes, distribución, entre otros).

3.3 Fase de laboratorio (FASE 2)

Teniendo ya las muestras tomadas en la fase de campo, se procedió a transportarlas al laboratorio de suelos ubicado en la sede de Piedecuesta y el laboratorio de geología en la sede de

Floridablanca de la Universidad Santo Tomás, donde todos los materiales no consolidados (muestras de suelo) se procesaron en ensayos de granulometría, humedad natural, límites de consistencia y demás; mientras que los materiales consolidados (muestras de roca) se procesaron mediante una clasificación petrográfica de muestras de mano textural y composicionalmente.

3.4 Fase de interpretación (FASE 3)

En esta fase se integraron todos los resultados obtenidos durante las fases anteriores (campo y laboratorio), el análisis geológico - geotécnicos de estabilidad de taludes y la definición de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo del proyecto.

3.5 Fase de generación de mapas (FASE 4)

Para esta fase se desarrolló la generación de los mapas de las variables (geología, geomorfología, usos de suelo, entre otros) y el modelamiento de los taludes con el fin de definir las zonas con presencia de amenazas geológicas y geotécnicas dentro del área de estudio; esto se llevó a cabo con ayuda de las metodologías propuestas por el Servicio Geológico Colombiano y el IDEAM, como el uso de softwares GIS y SLIDE, generándose de esta forma la estratificación de capas de los mapas y modelos.

3.6 Fase de productos finales (FASE 5)

Para finalizar el proyecto, en esta fase se realizó y revisó todos los entregables propuestos en el proyecto como lo son: el documento escrito de soporte de la investigación del proyecto y los mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, los cuales fueron elaborados en ArcGIS, apoyados también con los modelos realizados en SLIDE.

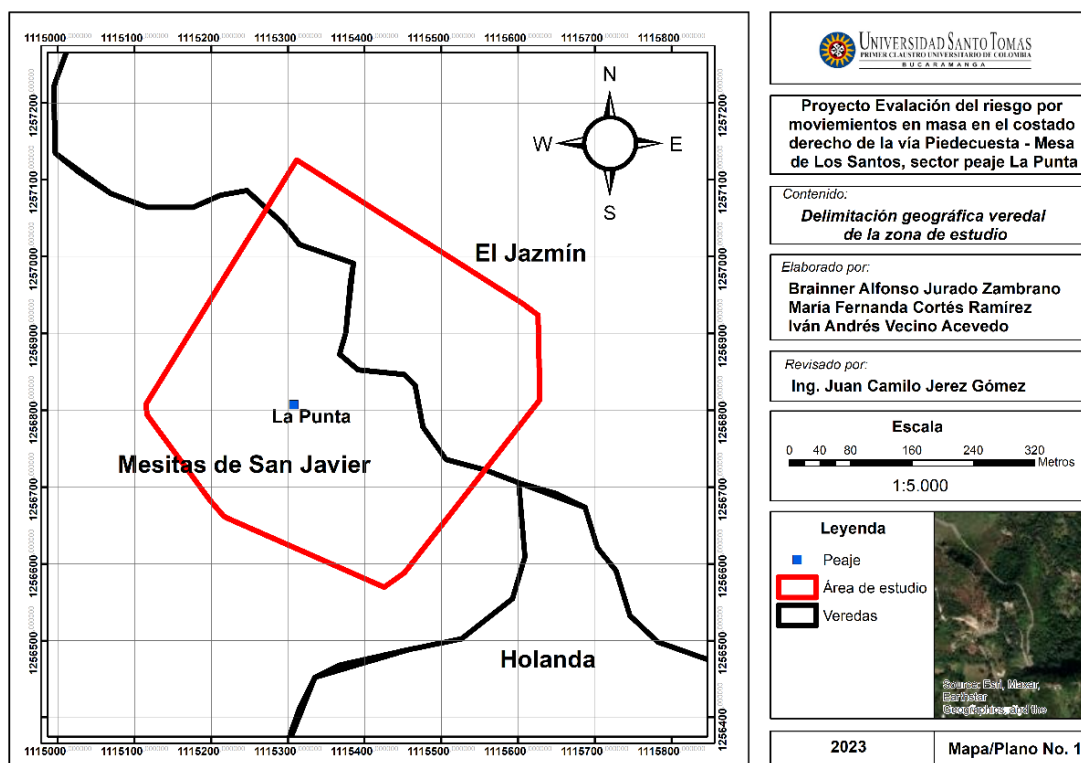
4. Desarrollo

4.1 Análisis de información existente para el desarrollo geológico-geotécnico

4.1.1 Geografía

La zona de análisis del proyecto se encuentra ubicada en el municipio de Piedecuesta, Santander, específicamente en la vía Piedecuesta - Mesa de Los Santos, entre las veredas de Mesitas de San Javier y El Jazmín (ver figura 6), destacándose el peaje La Punta como el punto de mejor localización. Este peaje se encuentra en una zona montañosa con altitudes variables desde los 500 hasta los 1800 metros sobre el nivel del mar. El área intervenida para este proyecto abarca 173380,54 m² con un perímetro de 1585,69 m.

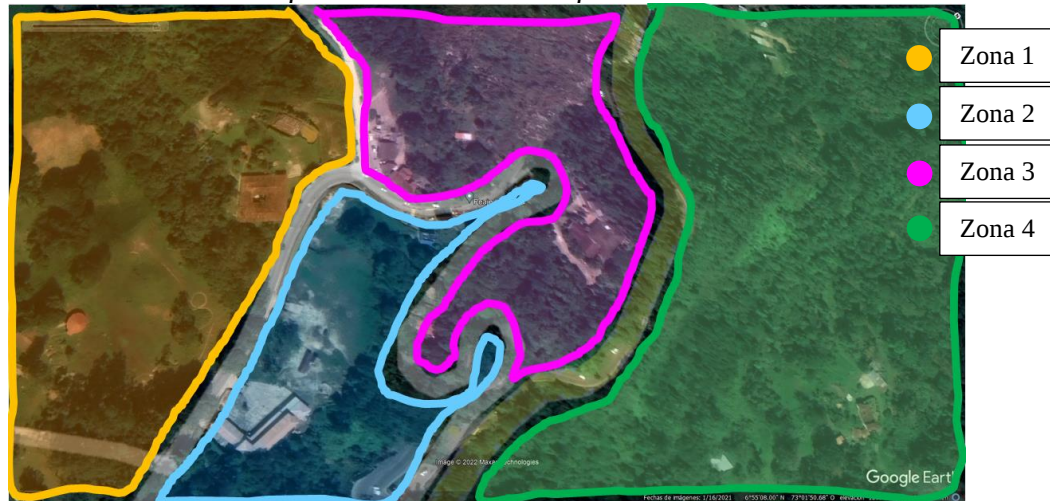
Figura 6. Mapa de delimitación geográfica veredal de la zona de estudio



4.1.2 Análisis multitemporal

Para obtener un mejor conocimiento de la zona del peaje La Punta, se llevó a cabo un análisis espacial y temporal. La zona de estudio se dividió en cuatro partes, separadas por la carretera que atraviesa el peaje La Punta, lo que permitió obtener el siguiente análisis:

Figura 7. *Delimitación de zonas para análisis multitemporal*



Adaptado de [39].

Figura 8. *Fotografías satelitales para análisis multitemporal*

Adaptado de [39].

Zona 1 - Esta área se ubica en una carretera y un peaje que conecta la Mesa de los Santos con Piedecuesta. En el año 2014, constaba de cuatro edificaciones y una extensa área verde.

Para el año 2015, las cuatro edificaciones aún se mantenían en su lugar, y la zona verde había experimentado cambios menores, como el crecimiento de la cobertura vegetal, probablemente de manera natural. En el año 2016, la arborización en la zona 1 aumentó en comparación con el año anterior, sugiriendo que no se realizaron actividades de mantenimiento, lo que permitió que la cobertura vegetal se expandiera y rodeara las edificaciones, ofreciendo cierta protección contra la contaminación y otros impactos negativos de la carretera.

No obstante, para el año 2017, las edificaciones empezaron a extenderse, y la arborización de la zona disminuyó ligeramente. Esto pudo deberse al impacto del turismo en la zona, lo que

llevó a la expansión de las edificaciones y la reducción de la vegetación. Hacia el año 2021, una parte de la zona 1 que se había destinado a la construcción de edificaciones comenzó a recuperar su cobertura vegetal, sugiriendo que las expansiones de las edificaciones habían concluido, y no se realizaron más modificaciones en el terreno, permitiendo la recuperación de la vegetación.

Zona 2 - La zona 2 se encuentra en la mitad inferior del área de estudio, cerca del peaje La Punta. En el año 2014, se observaron tres edificaciones frente a la vía y una extensa cobertura vegetal que abarcaba gran parte del área. Durante el año 2015, no se presentaron cambios significativos en la zona 2, excepto un leve crecimiento de la cobertura vegetal, sugiriendo un desarrollo natural a lo largo del tiempo.

En el año 2016, se inició una construcción en la parte izquierda de la zona 2, afectando considerablemente la cobertura vegetal y generando impactos negativos en el ecosistema. En el año 2017, la construcción que había comenzado el año anterior se expandió aún más, afectando aún más la cobertura vegetal y provocando posibles daños en la biodiversidad y la calidad del aire. Para el año 2021, la construcción que había iniciado en 2016 parecía estar finalizada, aunque se observó que la zona verde afectada en 2017 comenzó a expandirse nuevamente. Esto sugiere que, al finalizar la obra, no hubo más modificaciones en el terreno, y la cobertura vegetal pudo empezar a recuperar su espacio.

Zona 3 - Esta zona actúa como un área de transición entre la Mesa de los Santos y Piedecuesta, conectadas por una importante vía y el peaje La Punta. En el año 2014, se caracterizaba por la presencia de 8 edificaciones rodeadas de amplias áreas verdes con una extensa cobertura vegetal.

En el 2015, no se observaron cambios significativos en la zona, aunque se notó un pequeño incremento en la cobertura vegetal. En el 2016, se observó una mayor expansión de la arborización,

principalmente en la parte central de la zona. Este proceso continuó en el 2017, aunque se evidenció que las construcciones de obras en las edificaciones ya empezaban a afectar parte de la cobertura vegetal. Para el año 2021, las obras en las edificaciones ya habían finalizado, y se pudo observar una recuperación parcial de la zona vegetal que se había visto afectada. Sin embargo, se notó una importante disminución de la cobertura vegetal original, especialmente en las áreas cercanas a las edificaciones.

Zona 4 - Durante los años de estudio del análisis multitemporal de la zona 4, no se encontraron cambios significativos en cuanto a las características físicas y visuales de esta, en comparación con las áreas verdes de y las edificaciones.

4.1.3 Antecedentes del proyecto

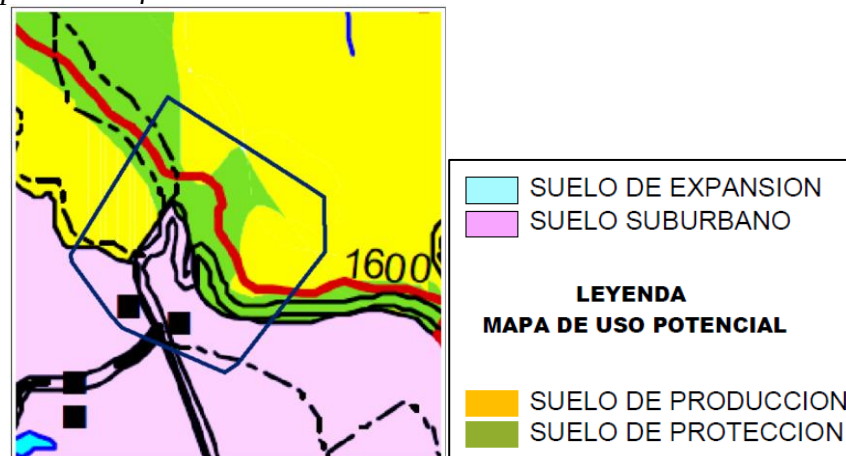
Como antecedentes para esta investigación sobre amenazas y el comportamiento de la zona, se tomaron en consideración el Plan Básico de Ordenamiento Territorial de Piedecuesta y un inventario de eventos y afectaciones naturales ocurridos tanto en la zona de estudio como en sus alrededores.

4.1.3.1 Información existente. Según el diagnóstico rural del municipio de Piedecuesta en el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT), el área de estudio está expuesta a diversas amenazas por remoción en masa, lo que aumenta la probabilidad de deslizamientos de tierra, desprendimiento de rocas, flujos, entre otros riesgos, especialmente durante la temporada de lluvias (ver figura 9). No obstante, también se identificaron áreas de baja amenaza urbanística en el sector de estudio.

Figura 9. Mapa de diagnóstico rural - PBOT Piedecuesta

Adaptado de [25].

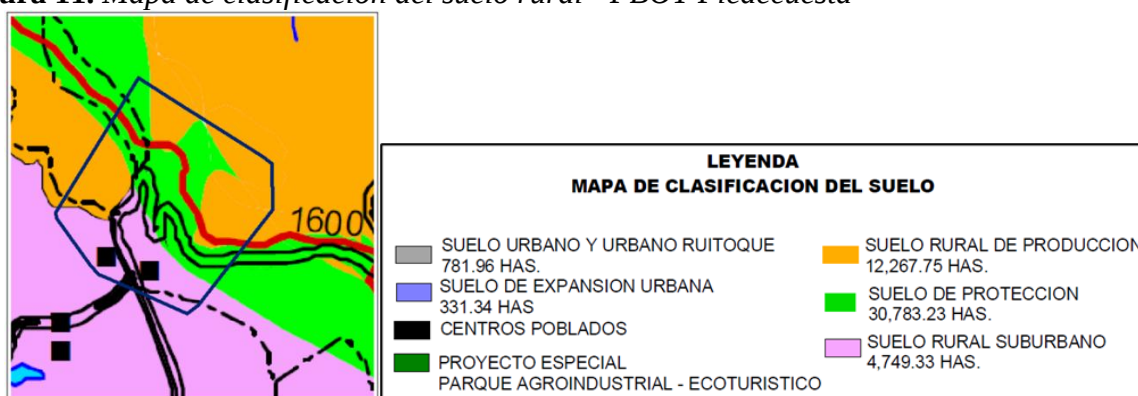
El área de estudio se encuentra clasificada en dos tipos de uso potencial de suelo: suelo de producción y suelo de protección (ver figura 10). El suelo de producción es utilizado para el cultivo de diversas plantas y alimentos, es decir, destacándose la agricultura; en la parte del suelo de protección que se evidencia en la zona, es debido a que está restringida en la posibilidad de urbanizarse debido a las amenazas presentes en el sector, como los frecuentes movimientos en masa. Además, se observa que una parte de la zona se considera suelo suburbano, esto influenciado por la mezcla de los usos del suelo y las formas de vida del campo y la ciudad.

Figura 10. Mapa del uso potencial del suelo rural - PBOT Piedecuesta

Adaptado de [25].

Con respecto al mapa de clasificación del suelo rural del municipio de Piedecuesta, el área de estudio muestra una combinación de suelo en protección por las amenazas existentes (remoción en masa) y suelo de producción debido a la presencia de actividades agrícolas en la zona. Además, también se identifica una porción de suelo rural suburbano, ya que puede ser objeto de desarrollo entre la vida rural y la urbana (ver figura 11).

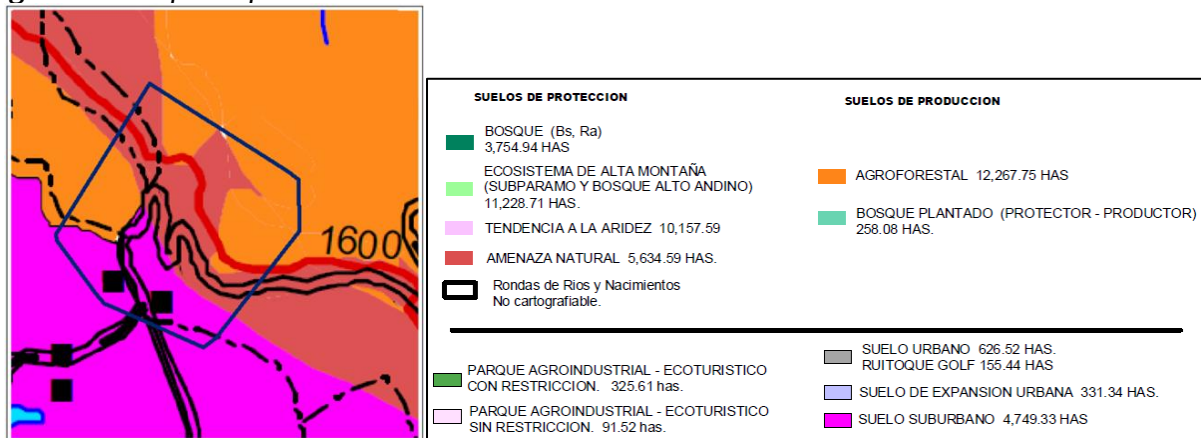
Figura 11. Mapa de clasificación del suelo rural - PBOT Piedecuesta



Adaptado de [25].

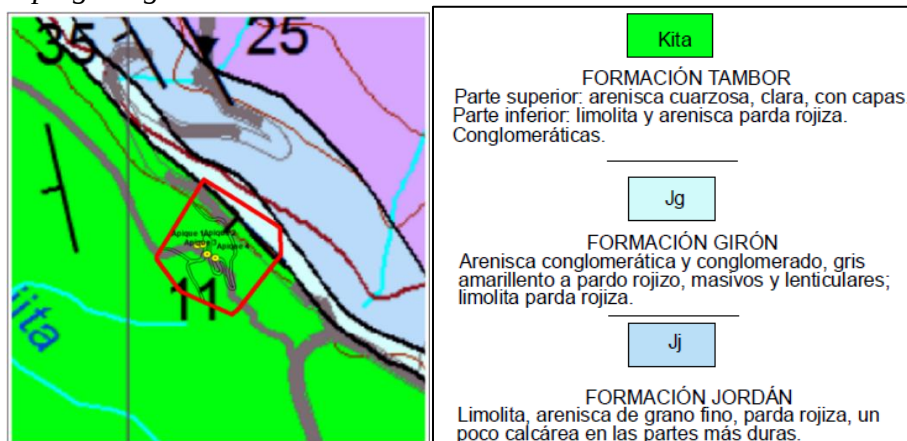
Según el mapa de formulación rural del PBOT de Piedecuesta, la zona de estudio se clasifica en diferentes categorías (ver figura 12). Una parte de la zona se designa como zona de protección debido a amenazas naturales existentes, ocasionados por sismos y eventos geológicos, incluyendo deslizamientos de tierra y desprendimiento de rocas. Otra porción está destinada para suelo de producción agroforestal, enfocado principalmente en la agricultura.

Además, se identifica una parte del área como suelo suburbano, lo que puede deberse al crecimiento de la región en actividades como el turismo.

Figura 12. Mapa de formulación rural - PBOT Piedecuesta

Adaptado de [25].

Según el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la zona de estudio exhibe una formación geológica conocida como Tambor o Los Santos (Kita), resultado de procesos geológicos complejos que incluyeron sedimentación, volcanismo y deformación tectónica (ver figura 13). Esta formación está compuesta por areniscas cuarzosas y conglomerados. Se clasifica dentro del grupo de rocas ígneas que se formaron durante la era del Mesozoico, específicamente en el Cretáceo inferior.

Figura 13. Mapa geológico – SGC

Adaptado de [26].

4.1.3.2 Inventario de eventos y afectaciones naturales. Los sucesos más concurridos en el sector se deben a los eventos climáticos, los cuales han afectado significativamente la movilidad y la infraestructura vial en la región, generando preocupación por la seguridad y el bienestar de las comunidades afectadas.

En los informes del IDEAM en los años 2010 y 2011, se registraron grandes eventos relacionados con el cambio climático debido al fenómeno de La Niña, que afectaron gravemente a diversas poblaciones y municipios. Las principales afectaciones incluyeron avalanchas, inundaciones, movimientos de remoción en masa, deslizamientos y vendavales, entre otros. Los municipios más afectados incluyeron Sevilla, Planadas, Miraflores, Cristales, El Polo, Pinchote, La Cuchilla, San Isidro, Pajonal, Monterredondo, Guatiguará y La Mata.

En particular, el sector agrícola de Piedecuesta, que es un importante proveedor de alimentos para la ciudad, sufrió daños significativos debido a las destrucciones ocasionadas por La Niña en las vías de comunicación, como la vía el Molino-Sevilla, Km40 y la vía alterna a la Mesa de los Santos en el punto conocido como el "Buey". Estos desastres llevaron al colapso de las carreteras, taponamiento de alcantarillas, destrucción de caminos y obras de arte.

El fenómeno de El Niño también tiene un impacto significativo en el clima del país, generando una variabilidad climática que provoca déficit hídrico en las regiones Atlánticas y Andinas, y excesos hídricos en la región Pacífica y Amazonía.

En cuanto a eventos más recientes, según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), la región ha sido afectada por varios eventos de deslizamientos y movimientos en masa en los últimos años:

En el 2018, específicamente el 29 de mayo, un fuerte aguacero causó una avalancha en el sector de Los Curos, afectando a varios vehículos que transitaban por la vía. La zona presenta una alta inestabilidad geológica por lo que el cierre fue de manera total.

Figura 14. *Avalancha en el sector de Los Curos el 29/05/2018*



Tomado de [27].

El 26 de febrero del 2020, se registraron deslizamientos en el sector de Piedecuesta, lo que causó el cierre temporal de la vía, además, dejando 12 personas desaparecidas y 3 personas fallecidas en la Vereda Barro Blanco de Piedecuesta, Santander.

Figura 15. *Deslizamiento del 26-02-2020 en la vía Piedecuesta-Mesa de Los Santos*



Tomado de [28].

El 27 de febrero del 2020, se cerró una vía debido a la avalancha de lodo y rocas en un puente del sector, en la vía Piedecuesta-Mesa de los Santos, en donde el cierre de la vía tras la avalancha afectando la estructura del puente ubicado 200 metros adelante del restaurante el Bwey, sobre la quebrada San Francisco, Según informó Vanguardia.

Figura 16. Deslizamiento de rocas vía Piedecuesta-Mesa de Los Santos 27-02-2020



Tomado de [29].

El 1 de marzo y el 4 de abril de 2022, también se presentaron deslizamientos y derrumbes en la misma vía debido a fuertes lluvias.

Figura 17. Derrumbe del 01-03-2022 y 04-04-2022 en la vía Piedecuesta-Mesa de Los Santos



Tomado de [30].

Nuevamente en el 2022, el 21 de septiembre se presentó un derrumbe en la vía Piedecuesta-Mesa de los Santos por las fuertes lluvias registradas, lo que ocasionó el cierre parcial de la vía.

Figura 18. *Movimiento en masa en la vía Piedecuesta-Mesa de los Santos 21-09-2022*



Tomado de [31].

El 16 de abril de 2023, se registraron deslizamientos de tierra y caídas de árboles en dos puntos específicos de la vía Piedecuesta - Mesa de Los Santos, afectando el tráfico y dejando a muchos viajeros bloqueados. Además, las lluvias intensas provocaron la caída de rocas en la vía San Gil-Pescadero.

Figura 19. *Deslizamiento de 16-04-2023 en la vía Piedecuesta-Mesa de Los Santos*



Tomado de [32].

4.2 Modelo geológico – geotécnico

Para llevar a cabo los laboratorios y análisis, se tomaron 4 muestras en el lugar de estudio, siendo dos de suelo y dos de roca, donde sus coordenadas son las siguientes:

Tabla 2. *Coordenadas de las muestras*

Muestra	Abscisa [m]	Ordenada [m]	Tipo de muestra
1	1115285	1256853	Suelo
2	1115306	1256857	Roca
3	1115326	1256815	Roca
4	1115361	1256801	Suelo

4.2.1 Laboratorios de suelos

Las muestras de suelo obtenidas del costado derecho de la vía Piedecuesta-Mesa de Los Santos, específicamente en el peaje de La Punta, fueron analizadas en el laboratorio de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás de Bucaramanga. Estas muestras fueron extraídas utilizando tanto barreno como recolección manual, siendo un total de 5 muestras para su respectivo análisis.

Figura 20. *Recolección de muestras*



Después de recolectar las muestras de suelo, se llevó a cabo la preparación adecuada de acuerdo con la norma I.N.V.E 107, utilizando el método B.

Figura 21. *Preparación de muestras*



Figura 22. *Lavado de las muestras*



Figura 23. *Secado de muestras*

4.2.1.1 Laboratorio 1 – Humedad natural. El laboratorio de humedad natural se realizó de acuerdo con la norma I.N.V.E 122, la cual consiste en que el contenido de agua o humedad se refiere al porcentaje del peso total de agua en una masa de suelo específica en relación con el peso de las partículas sólidas presentes que sirve para establecer correlaciones con el comportamiento de los suelos [8].

Figura 24. *Ensayo de humedad natural*

Tabla 3. *Resultados de ensayo de humedad natural*

Tara No.	Peso Muestra húmeda (g)	Peso Muestra seca (g)	Peso agua en la muestra (g)	Humedad (%)
A	519,45	440,44	79,01	17,94
B	617,66	512,89	104,77	20,43
C	591,98	422,18	169,8	40,22
D	846,13	674,81	171,32	25,39
E	960,41	804,37	156,04	19,40

4.2.1.2 Laboratorio 2 – Ensayo de granulometría mediante el método S.U.C.S. Se realizó el ensayo de granulometría mediante el método SUCS, de acuerdo con la norma I.N.V.E 103, la cual consistió pasar cada material de las muestras en seco por un juego de tamices e ir pesando el material retenido en cada uno de ellos, esto como fin de obtener la composición de cada muestra y poder determinar el tipo de suelo que presenta el sector de estudio.

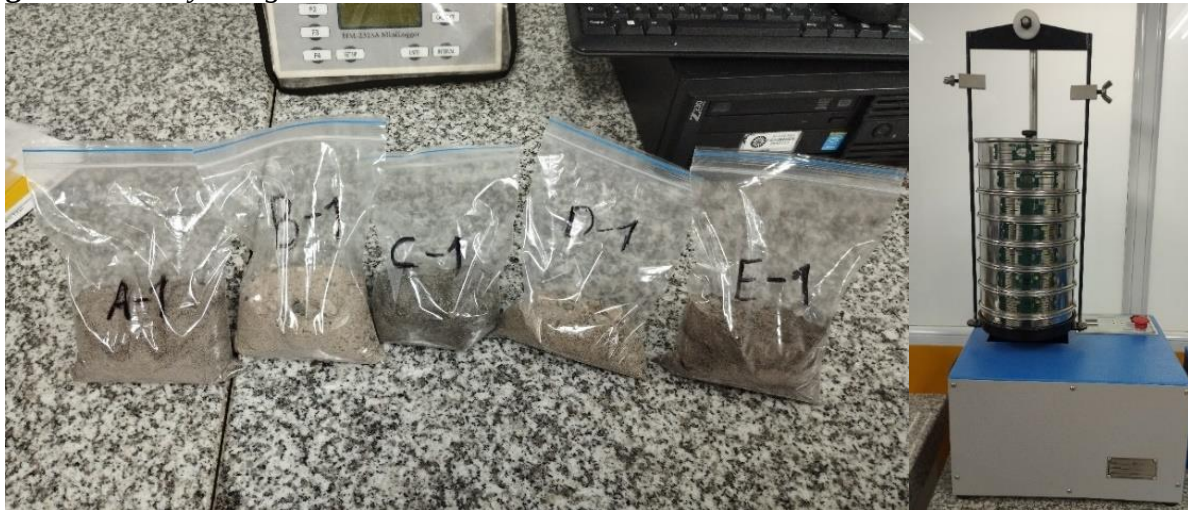
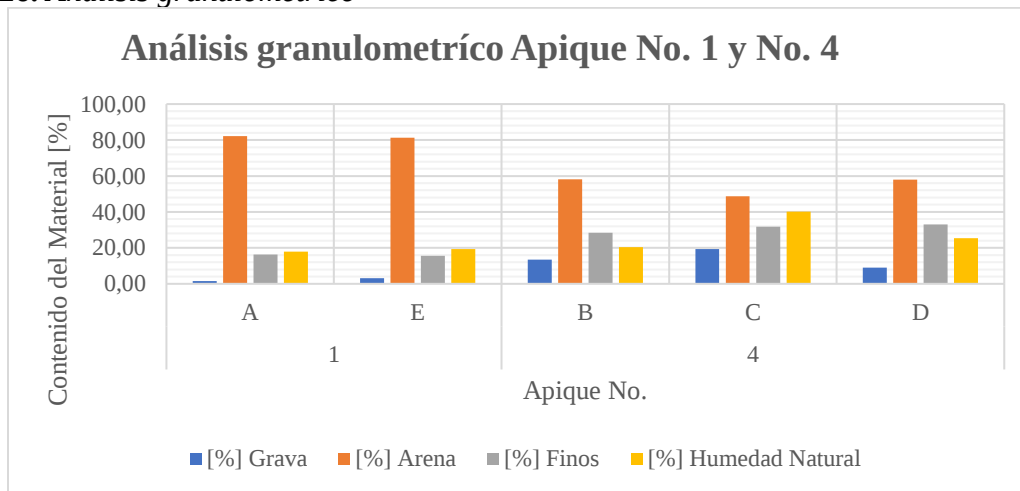
Figura 25. *Ensayo de granulometría*

Figura 26. Análisis granulométrico

4.2.1.3 Laboratorio 3 - Ensayo de límites de Atterberg. El ensayo de límites de Atterberg se dividió en dos partes, en ensayo de límite líquido que se realizó de acuerdo con la norma I.N.V.E 125 y el ensayo de límite plástico e índice de plasticidad que se ejecutó según lo indicado en la norma I.N.V.E 126.

Al realizar este ensayo se evidenció que las muestras de suelo no presentaron índice de plasticidad, esto significa que el suelo obtenido no tiene capacidad de deformación plástica y es no plástico, esto también se debe a que el sector presenta alto porcentaje de material orgánico.

Figura 27. *Ensayo de límites de Atterberg*

Finalmente, al realizar los respectivos laboratorios de suelo de las muestras recolectadas en campo, se determinó que el tipo de suelo que presenta la zona de estudio es un suelo areno limoso (SM).

Tabla 4. *Compilación de resultados de laboratorios de suelo*

APIQUE No.	No. Muestra	Granulometría			Propiedades Índice				Clasificación SUCS
		[%] Grava	[%] Arena	[%] Finos	[%] Humedad Natural	[%] Limite Líquido	[%] Limite Plástico	[%] Índice de plasticidad	
1	A	1,48	82,24	16,27	17,94	N.P.	N.P.	N.P.	SM
	E	3,17	81,19	15,64	19,40	N.P.	N.P.	N.P.	SM
	B	13,48	58,15	28,36	20,43	N.P.	N.P.	N.P.	SM
4	C	19,37	48,78	31,85	40,22	N.P.	N.P.	N.P.	SM
	D	9,06	57,91	33,03	25,39	N.P.	N.P.	N.P.	SM

Nota: N.P. significa No Presenta.

4.2.2 Laboratorios de rocas

Los fragmentos de rocas extraídos en el costado derecho de la vía Piedecuesta-Mesa de Los Santos, en el peaje de La Punta fueron analizados en el laboratorio del departamento de

Ciencias Básicas de la Universidad Santo Tomás de Bucaramanga, donde fueron analizadas 10 muestras que se pudieron obtener.

Figura 28. *Muestras de rocas*



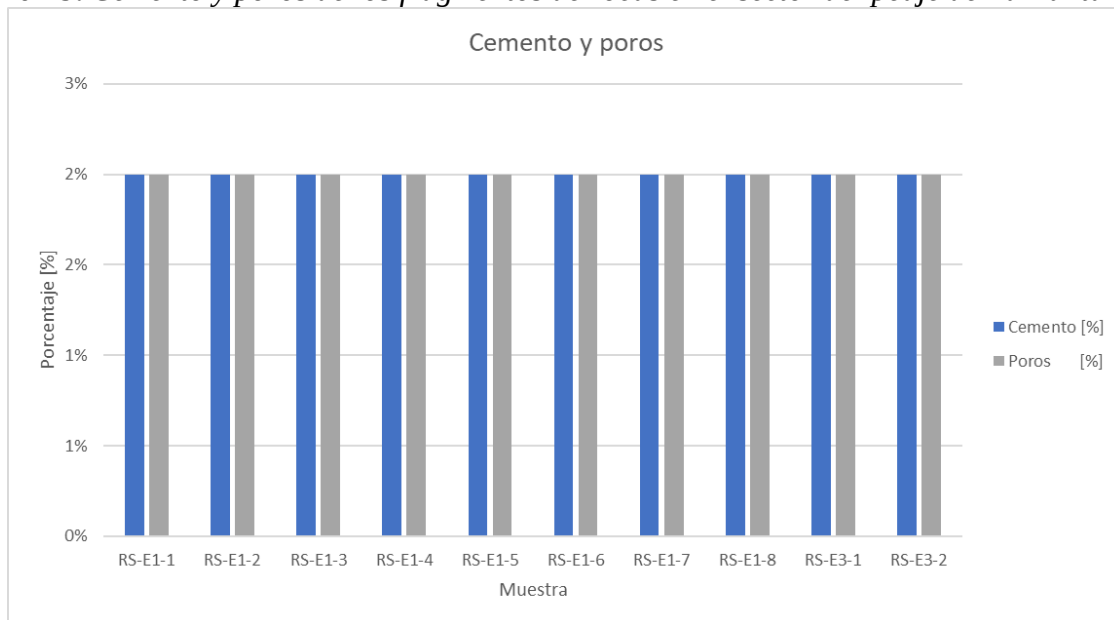
4.2.2.1 Ensayo de porosidad de rocas. La porosidad es una propiedad física fundamental en las rocas y materiales de construcción, ya que desempeña un papel crucial en la evaluación de su durabilidad y resistencia ante condiciones adversas. El ensayo de porosidad se lleva a cabo

mediante la introducción de fluidos en los espacios vacíos de la roca, lo que permite determinar el volumen de fluido absorbido.

En el laboratorio, se empleó un método directo para evaluar la porosidad. Este método consistió en utilizar ácido para observar el aspecto y la configuración tridimensional de la muestra, con el objetivo de determinar dicha propiedad, obteniendo como resultado una porosidad y cemento del 2%, definida como una porosidad Inter partícula.

El uso del método directo mediante ácido nos permitió obtener una visión detallada de la porosidad de las rocas, lo que resulta esencial para comprender su comportamiento frente a diferentes condiciones ambientales.

Figura 29. *Cemento y poros de los fragmentos de rocas en el sector del peaje de La Punta*



4.2.2.2 Determinación de propiedades físicas de rocas. En el ensayo de propiedades físicas, se observó que todas las muestras mostraron los mismos datos en cuanto a la clasificación composicional (Clástica o detrítica). Sin embargo, se encontraron pequeñas variaciones en la

clasificación textural, aunque todas las muestras fueron identificadas como Areniscas ligeramente lodosas.

Figura 30. Clasificación textural, armazón de la roca en el sector del peaje La punta

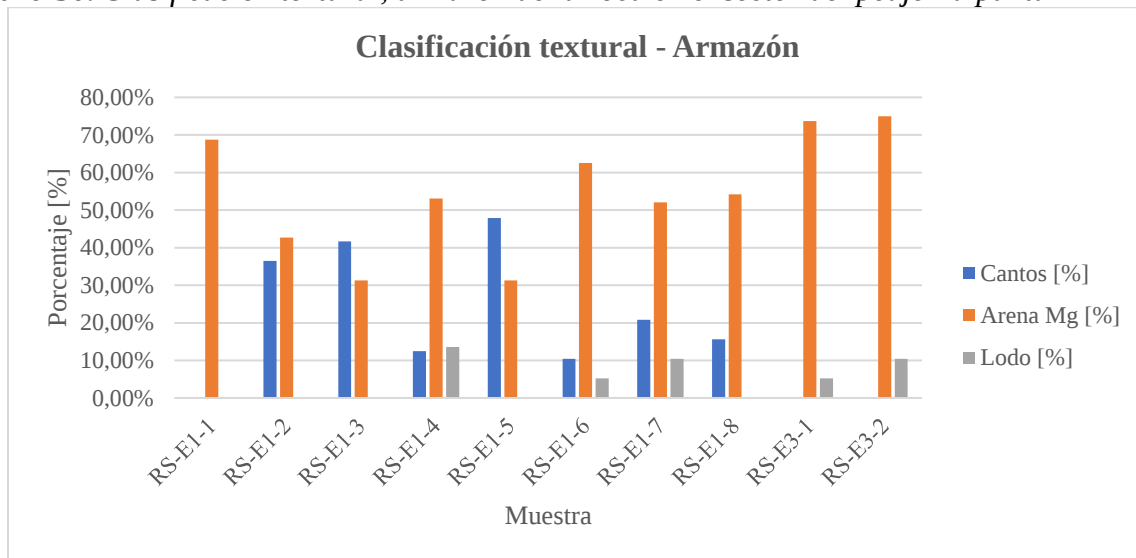


Figura 31. Clasificación textural, matriz de la roca en el sector del peaje La punta

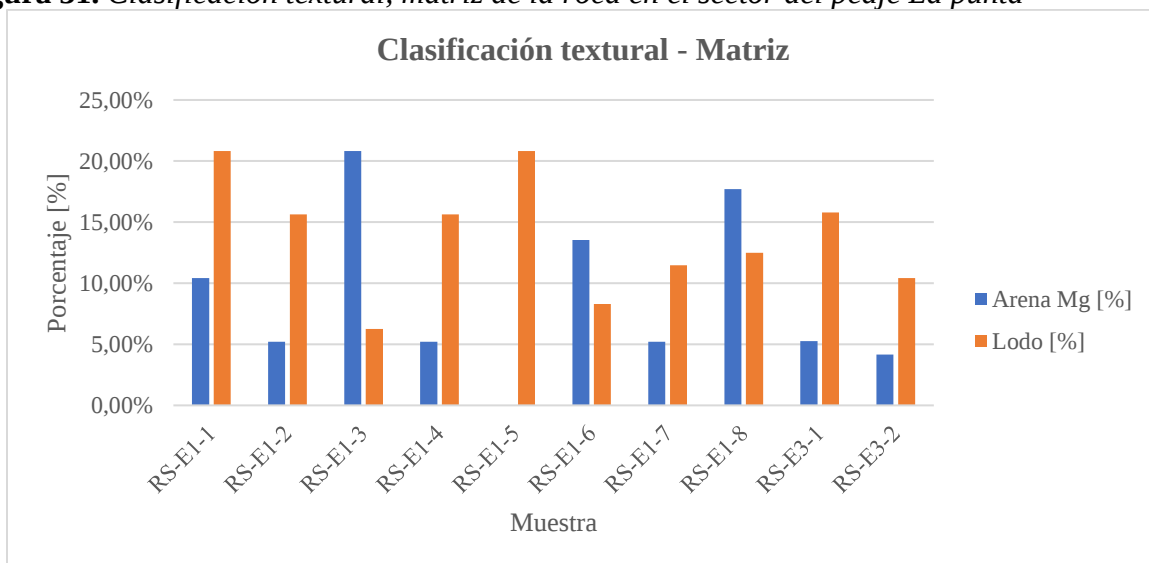
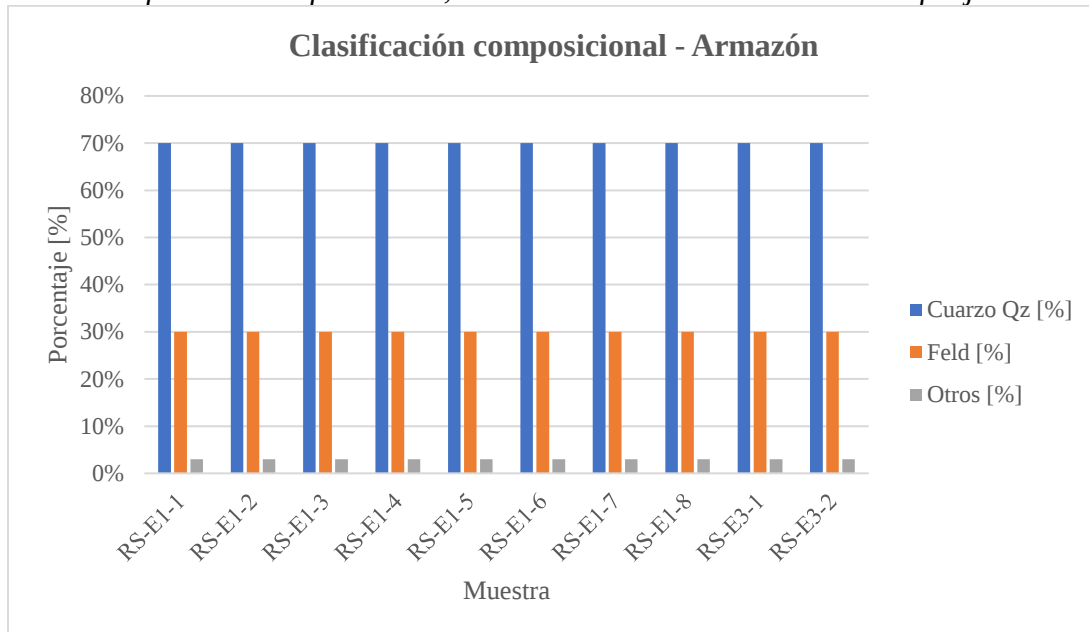
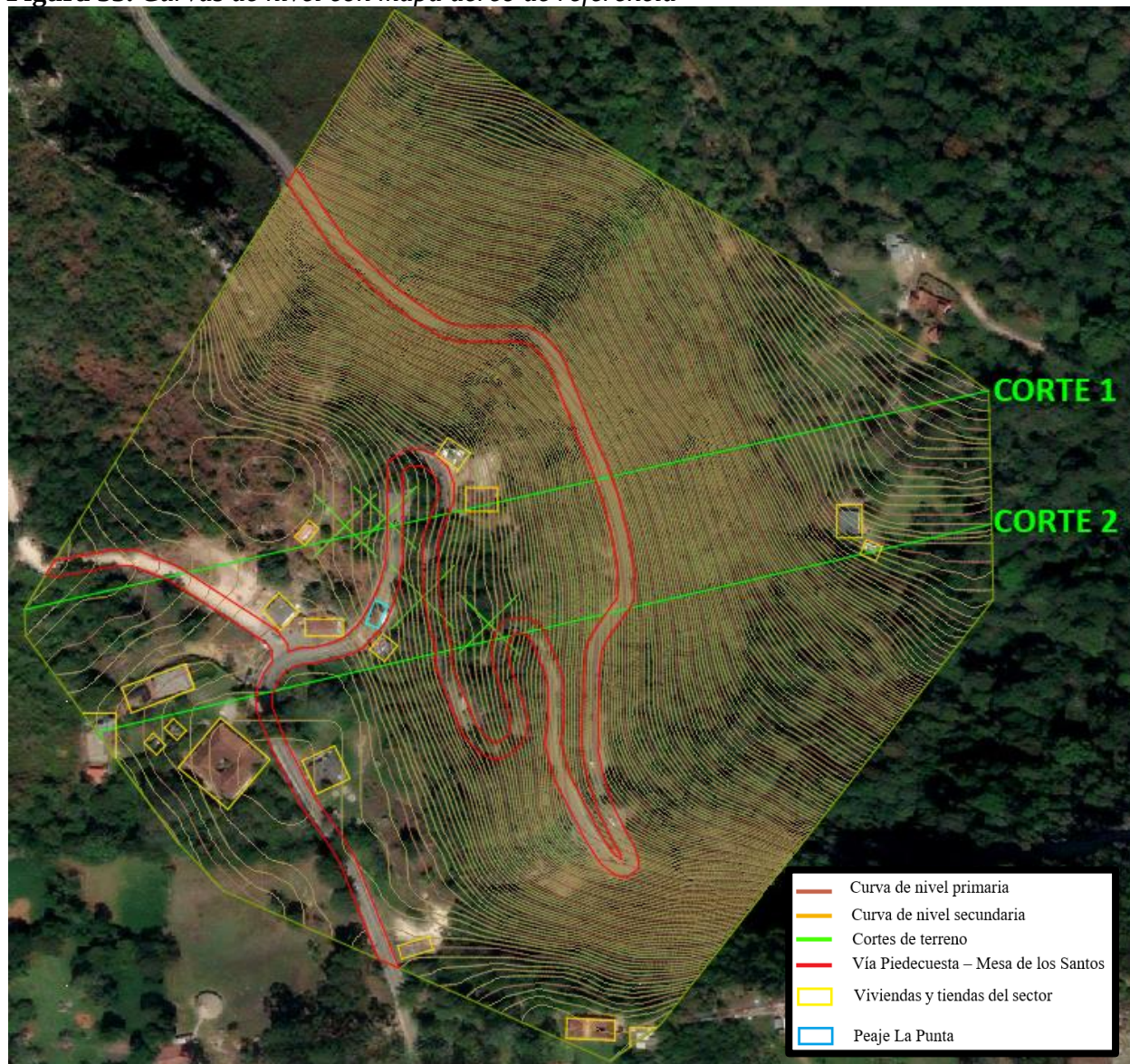


Figura 32. *Clasificación composicional, armazón de la roca en el sector del peaje de La Punta*

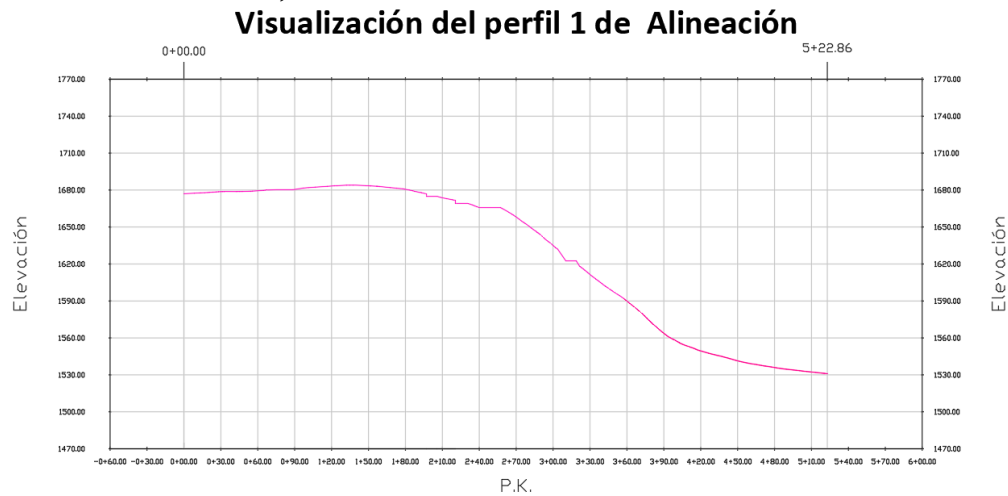
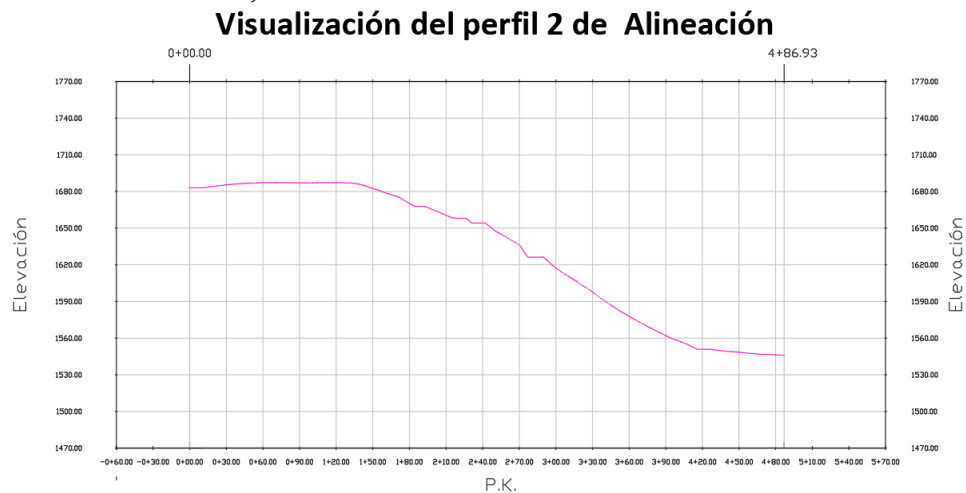
4.2.3 Perfil geológico – geotécnico

4.2.3.1 Modelamiento de perfiles Civil 3D y AutoCAD.

4.2.3.1.1 Civil 3D. Mediante un levantamiento topográfico por medio de un DRONE, se realizó la obtención de coordenadas del terreno, las cuales fueron colocadas en un archivo “.txt” con el fin de exportarlas como puntos en Civil3D, ya teniendo el grupo de puntos se definieron los límites del terreno y la superficie, donde las curvas de nivel se establecieron con intervalos de 5 metros entre las curvas principales y de 1 metro entre las curvas secundarias. Con la superficie ya definida, se procedió a dibujar la vía sobre la superficie, ubicar los puntos donde se realizó la toma de las muestras por medio de las coordenadas de la tabla 2 y finalmente plantear dos cortes en el terreno para evaluarlos.

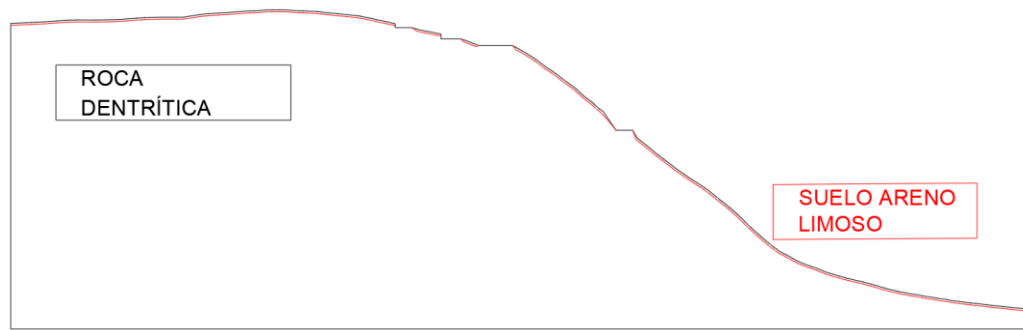
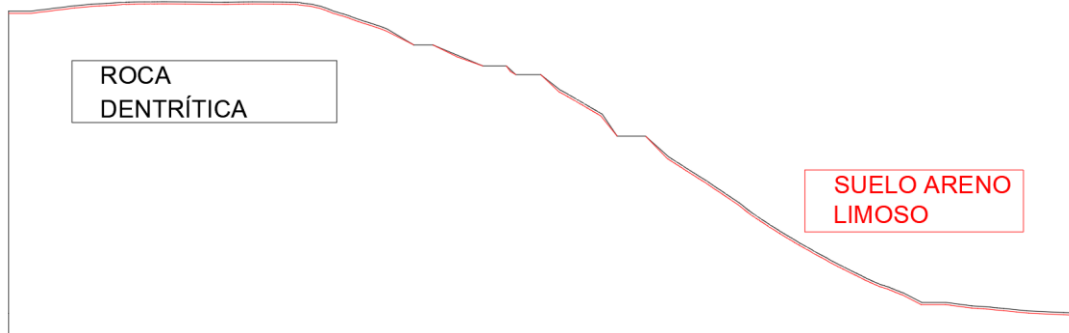
Figura 33. *Curvas de nivel con mapa aéreo de referencia*

Para realizar los perfiles, se plantearon las dos líneas verdes “Corte 1” y “Corte 2”, ya que con estas líneas se podrían realizar los cortes en Civil 3D, estos tenían que pasar a lo largo de la superficie, ya teniendo planteado las líneas, se prosiguió con los cortes rápidos en el programa.

Figura 34. Corte 1 del terreno, Civil3D**Figura 35. Corte 2 de terreno, Civil3D**

La distancia del primer corte llega hasta los 522.86 metros y el segundo corte hasta los 486.93 metros con aproximadamente 1685 metros de altura por cada corte, las partes planas que se observan en cada perfil pertenecen a la vía, casas y tiendas.

4.2.3.1.2 AutoCAD. Los perfiles fueron diseñados en AutoCAD sin las grillas y coordenadas, cada perfil se hizo en un archivo por aparte, con el fin de ser exportado en SLIDE.

Figura 36. Corte 1 del terreno, AutoCAD**Figura 37.** Corte 2 del terreno, AutoCAD

4.2.3.2 Factor de seguridad y parámetros geotécnicos del suelo. En la Ingeniería Civil en general el Factor de Seguridad FS se define como la relación entre fuerzas resistentes F_r y actuantes F_a y también pueden usarse esfuerzos y se usa para evaluar el estado límite de falla (NSR-10).

Según el Título H de la NSR-10, los valores del factor de seguridad se deben justificar teniendo en cuenta la magnitud de la obra, las consecuencias de una posible falla en la edificación o cimientos y la calidad de la información disponible en materia de suelos. Según el título H, existen dos factores de seguridad siendo los Factores de Seguridad Básicos Mínimos (F_{SBM}) y los Factores de Seguridad Básicos (F_{SB}), los cuales serán usados en este proyecto; la tabla H.2.4-1 del Título H, nos proporciona la información de los factores de seguridad de diseño y de construcción,

teniendo en cuenta esto, debido a que el proyecto a estudiar se encuentra en fase de diseño, el factor de seguridad del que se hará uso será el de diseño.

Tabla 5.

Tabla H.2.4-1 Factores de seguridad básicos mínimos directos

Condición	F_{SBM}
Taludes - Condición estática y agua subterránea normal	1,5
Taludes - Condición seudoestática con agua subterránea normal y coeficiente sismo de diseño	1,05

Adaptado de [33, p. 1446].

Como se puede observar, el F_{SB} de 1.5 es para taludes sin sismo, y el F_{SB} de 1.05 es para evaluar taludes con sismo, para este proyecto se tendrán en cuenta los dos, haciendo énfasis en los taludes con sismo, por lo cual, hay que devolverse al Título A donde nos proporciona el coeficiente de aceleración horizontal pico efectiva para diseño (A_a) y el coeficiente de aceleración de la velocidad horizontal pico efectiva para diseño (A_v), donde en la Apéndice A-4 da estos coeficientes para Piedecuesta siendo:

Tabla 6. *Valores A_a y A_v , Apéndice A-4*

Municipio	A_a	A_v	Amenaza sísmica
Piedecuesta	0,25	0,25	Alta

Adaptado de [33, p. 215].

Según la tabla H.502-1 del título H de la NSR-10, para materiales como suelos, enrocados y macizos rocosos muy fracturados se debe tomar el 80% de los coeficientes A_a y A_v por lo cual para este proyecto se tendrá en cuenta un valor de 0.2 en cada uno puesto que ambos valores son iguales.

4.2.3.2.1 Ángulo de fricción (ϕ). Mediante los laboratorios se determinó que el tipo de suelo que contiene el terreno es un Arena Limoso y el tipo de roca es Detrítica, dando como resultado una formación tambor, debido a que para el proyecto no contaba con el equipo necesario para determinar el ángulo de fricción del suelo, se realizó una búsqueda de información sobre proyectos que realizaron pruebas de laboratorio para determinar los parámetros geotécnicos de los suelos de la formación tambor en La Mesa de los Santos, habiendo un intervalo entre 29° y 38° [14], que para este proyecto se tuvo en cuenta un ángulo de fricción de 38° para la roca, para el suelo se encontró mediante una tabla de valores típicos de propiedades [15] que para que el ángulo de fricción para un suelo tipo turba, se encuentra entre un intervalo de 24° y 30° , que para este proyecto el ángulo de fricción del suelo será de 24° .

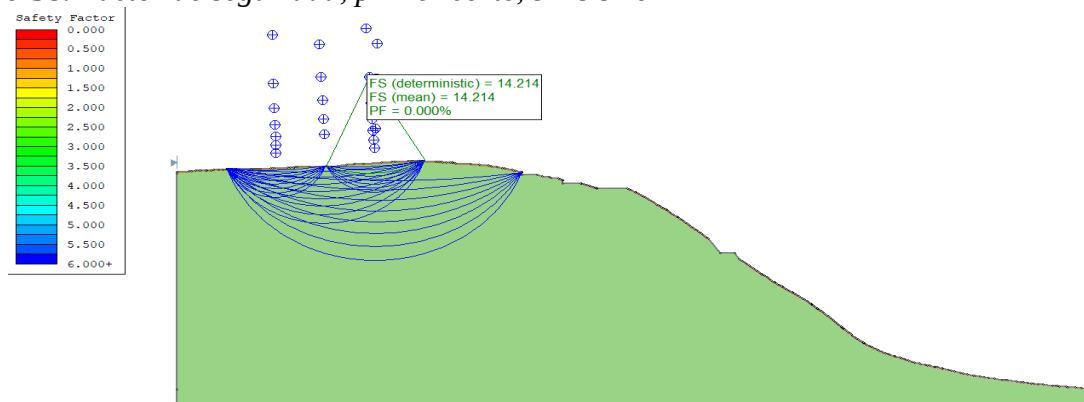
4.2.3.2.2 Peso unitario. Para el peso unitario, se tomó el mismo estudio de roca de la formación tambor [14], por lo cual para este proyecto el peso unitario de la roca será de 20 kN/m^3 y para el suelo, de la misma tabla de valores típicos de propiedades [15] se tomó el peso unitario del suelo siendo de 12.5 kN/m^3 .

4.2.3.2.3 Cohesión. Para la roca, del mismo estudio de la formación tambor se tomó como cohesión de la roca un valor de 13 kN/m^2 , ya para el suelo se obtuvo mediante un despeje de la fórmula que proporciona la tabla de valores típicos para un suelo tipo turba, siendo $\frac{C'}{\sigma'_{vc}} = 0.025$, que despejando la cohesión (C'), da un resultado de 0.31 kN/m^2 . Con los valores anteriores, se resume en la siguiente tabla:

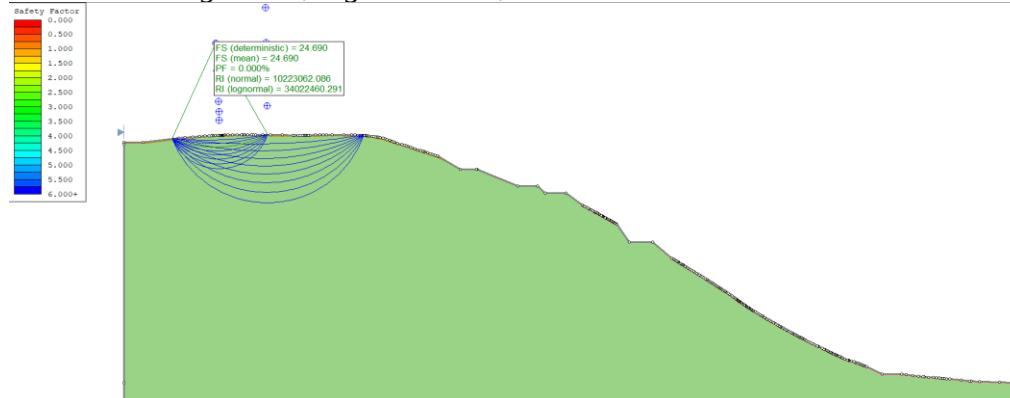
Tabla 7. *Ángulo de fricción, peso unitario y cohesión del suelo y la roca del proyecto*

Tipo	ϕ	γ	c'
Roca	38°	20 kN/m3	13 kN/m2
Suelo	24°	12,5 kN/m3	0,31 kN/m2

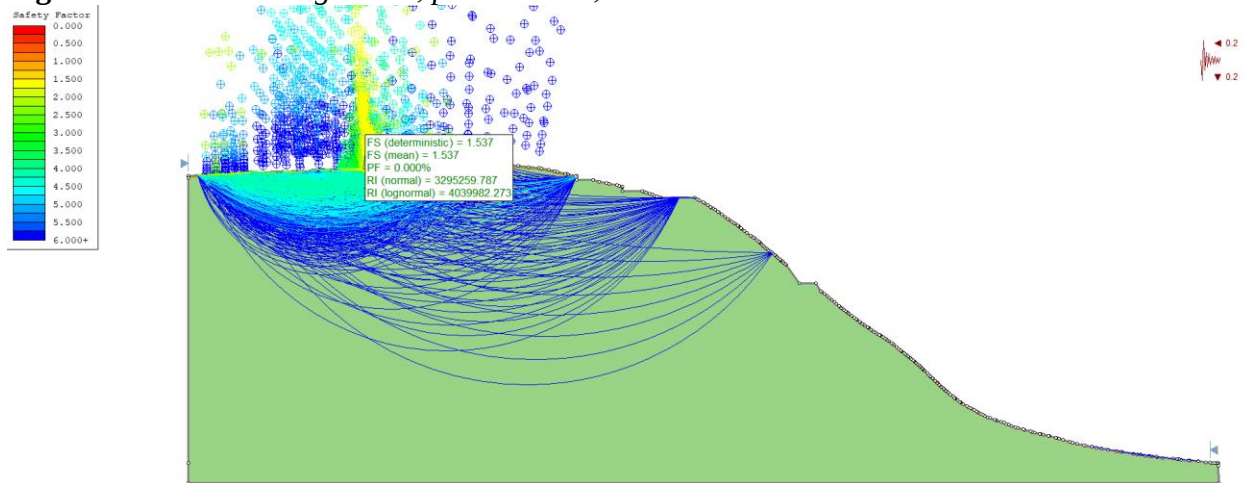
4.2.3.3 Procedimiento en SLIDE. Se procedió a exportar los archivos de AutoCAD (figura 22 y figura 23) a SLIDE, donde se definieron los materiales de cada estrato, es decir, la roca y el suelo, de las cuales a cada una se les definió sus parámetros geotécnicos con los valores de la tabla 7. Siendo así, se procedió a calcular el factor de seguridad sin sismo, es decir, sin agregar los valores de Aa y Av de la tabla 6.

Figura 38. *Factor de seguridad, primer corte, sin sismo***Tabla 8.** *Factor de seguridad en cada método, primer corte, sin sismo*

Métodos de factor de seguridad, Corte 1, sin sismo			
Bishop simplified	Janbu simplified	Spencer	GLE Morgenstern- Price
14,214	13,679	14,215	14,215

Figura 39. Factor de seguridad, segundo corte, sin sismo**Tabla 9.** Factor de seguridad en cada método, segundo corte, sin sismo

Métodos de factor de seguridad, Corte 2, sin sismo			
Bishop simplified	Janbu simplified	Spencer	GLE Morgenstern- Price
24,692	23,729	24,691	24,69

Figura 40. Factor de seguridad, primer corte, con sismo**Tabla 10.** Factor de seguridad en cada método, primer corte, con sismo

Métodos de factor de seguridad, con sismo, Corte 1			
Bishop simplified	Janbu simplified	Spencer	GLE Morgenstern- Price
1,537	1,497	1.538	1,539

Figura 41. Factor de seguridad, segundo corte, con sismo

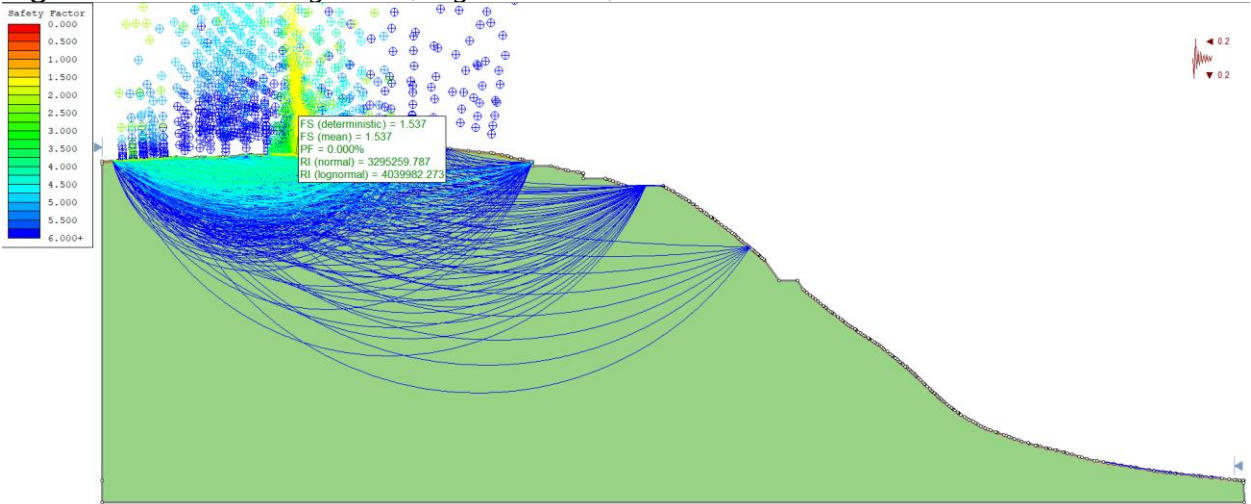


Tabla 11. Factor de seguridad en cada método, segundo corte, sismo

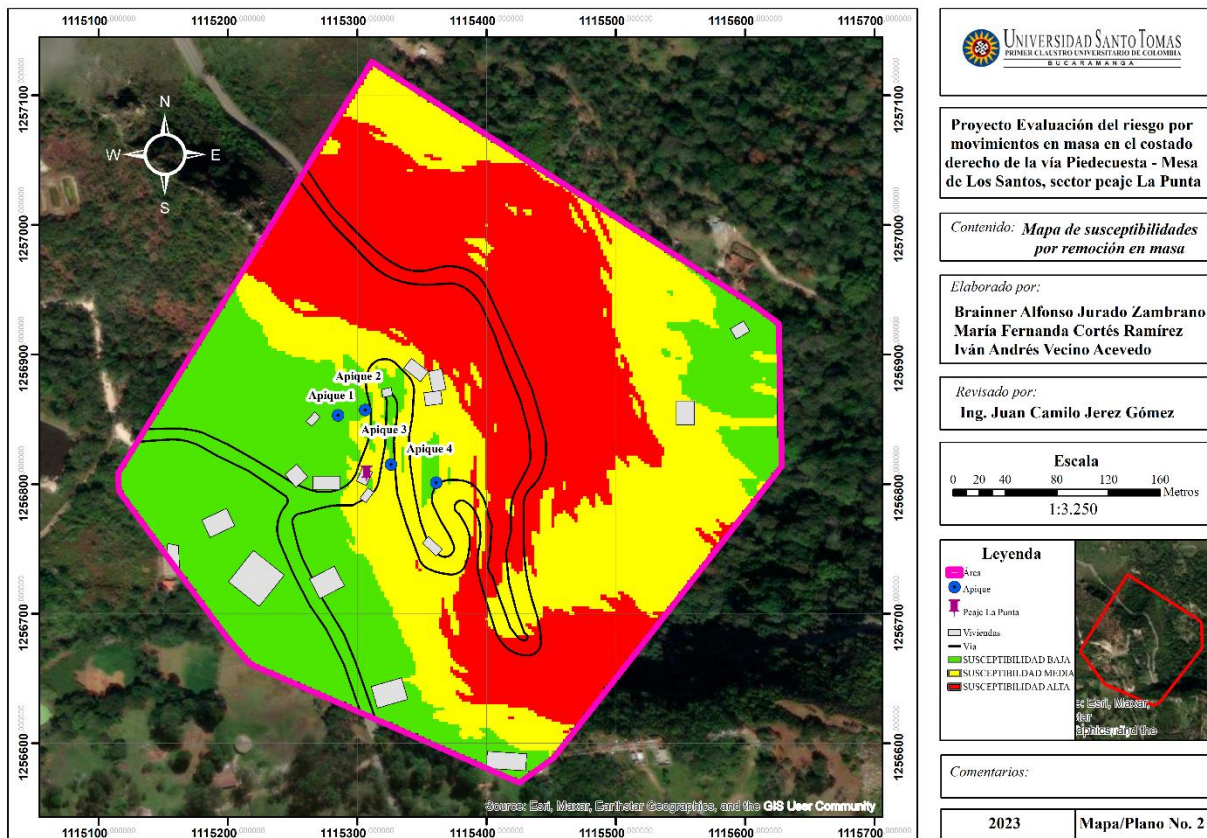
Métodos de factor de seguridad, con sismo, Corte 2			
Bishop simplified	Janbu simplified	Spencer	GLE Morgenstern- Price
1,65	1,643	1,651	1,651

Por último, se completó la elaboración del mapa de susceptibilidad de amenazas por remoción en masa (ver figura 42), consolidando los datos obtenidos a través del análisis de la estabilidad de los taludes en el software SLIDE. Como resultado, se lograron identificar los siguientes niveles de susceptibilidad en la zona investigada:

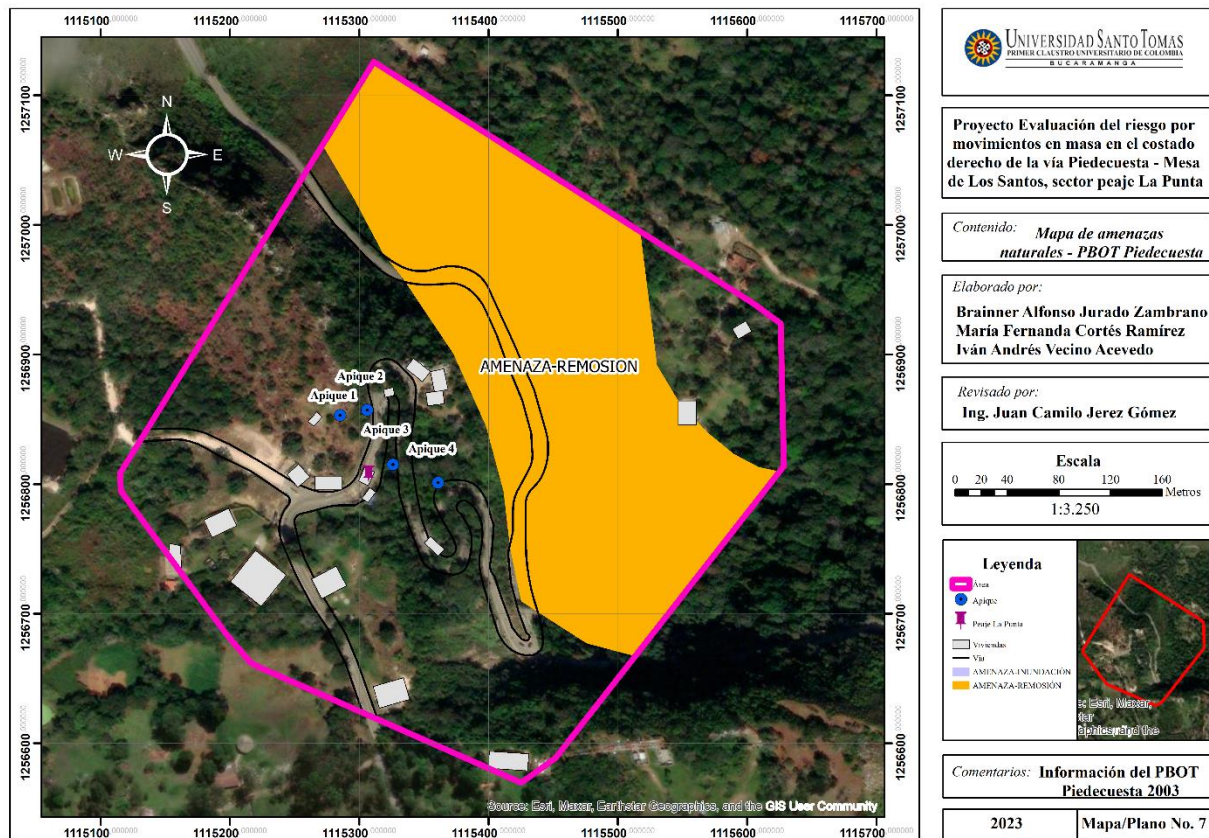
Tabla 12.

Niveles de susceptibilidad en la zona de estudio

Nivel	Porcentaje	Área (m ²)
Bajo	30.5%	5289.88
Medio	32.7%	5669.18
Alto	36.8%	6379.48

Figura 42. Mapa de susceptibilidad de amenazas por remoción en masa de la zona de estudio

Es evidente que en la zona de alta susceptibilidad no se encuentran construcciones cercanas, lo cual está en consonancia con la clasificación de uso del suelo según el Plan Básico de Ordenamiento Territorial (PBOT) de Piedecuesta, el cual, designa como suelo de protección debido a las elevadas posibilidades de amenazas naturales existentes en una parte del terreno analizado como lo son los movimientos en masa, siendo un 48.3% de afectación en el área estudiada (ver figura 43). Esta correlación se refuerza al observar el mapa de susceptibilidad. Por otro lado, es importante aclarar que como se pudo observar en el análisis de estabilidad de taludes, las laderas del sector en estudio son estables, sin embargo, debido al análisis de pendientes y a la información recopilada de algunos eventos de desprendimiento de material se toma la decisión de dejar algunas áreas como zonas de amenaza media y alta.

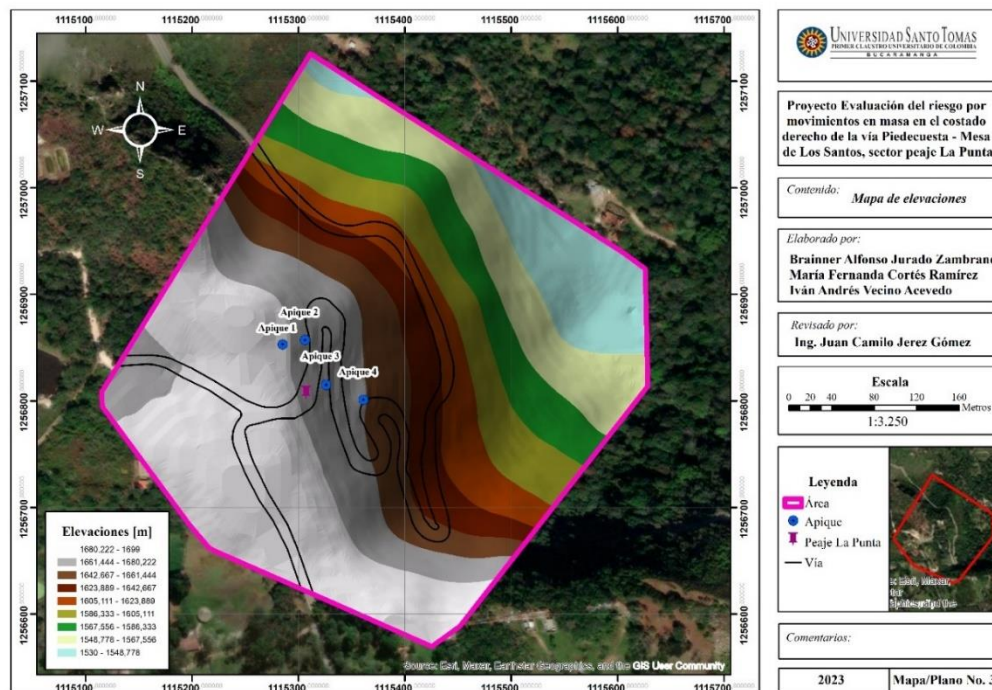
Figura 43. Mapa de amenazas naturales según el PBOT de Piedecuesta de la zona de estudio

Adaptado de [25].

4.3 Evaluación del AVR

4.3.1 Diagnóstico del sector del peaje La Punta

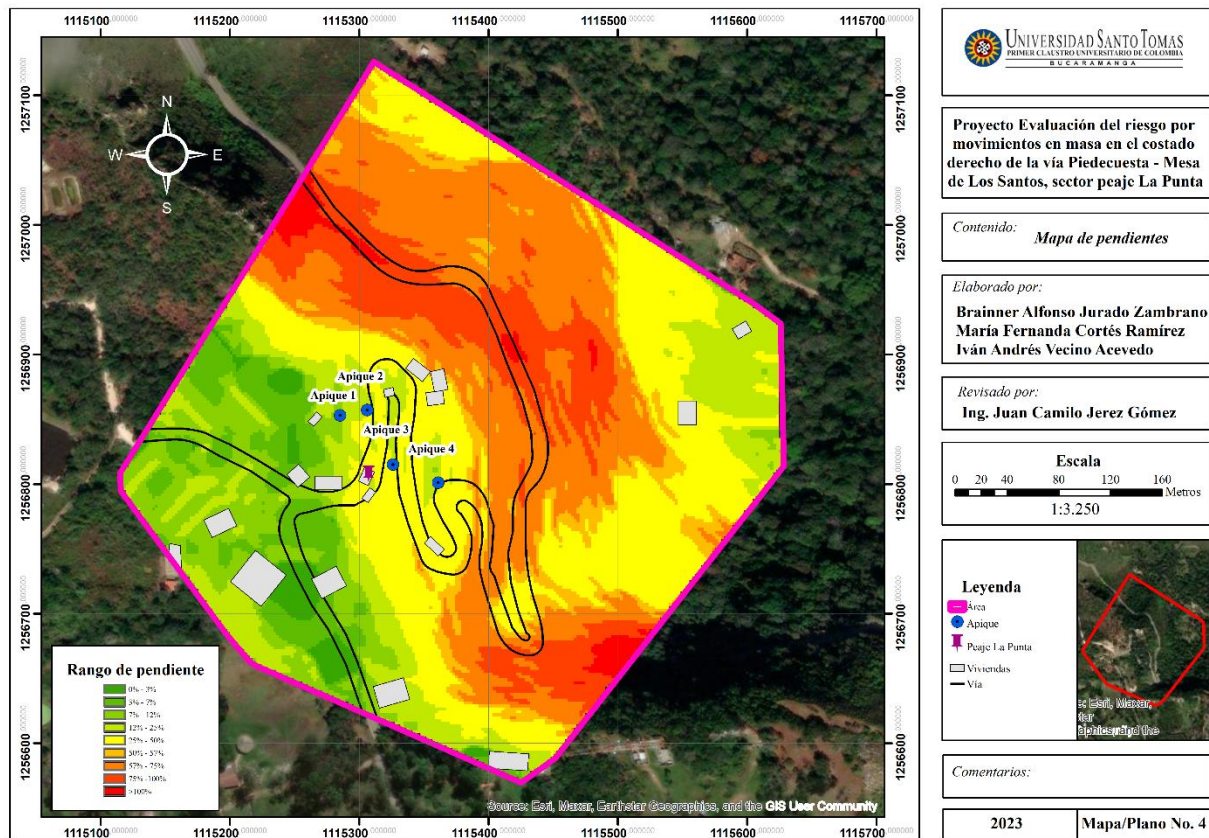
4.3.1.1 Topografía. El peaje La Punta se encuentra en una zona montañosa con altitudes variables que van desde los 1530 hasta los 1680 metros sobre el nivel del mar (ver figura 44).

Figura 44. Mapa de elevaciones de la zona de estudio

La topografía del área de estudio se caracteriza por ser una zona montañosa, ya que se encuentra ubicada en la cordillera oriental de Colombia, en la vía que conecta Piedecuesta con La Mesa de los Santos, predominando pendientes entre el 25% al 50% (ver figura 45). Cabe resaltar que los rangos de pendiente fueron determinados de acuerdo con la guía metodológica del Servicio Geológico Colombiano.

Tabla 13. Rangos de pendiente

No.	Rango	Área (m ²)
1	0% - 3%	351.34
2	3% - 7%	1190.10
3	7% - 12%	1597.54
4	12% - 25%	2160.90
5	25% - 50%	4519.58
6	50% - 57%	1149.60
7	57% - 75%	4079.78
8	75% - 100%	2011.42
9	> 100%	288.29

Figura 45. Mapa de pendientes de la zona de estudio

Se puede apreciar que los niveles de pendiente más elevados (rangos 5, 6, 7, 8 y 9) exhiben áreas de influencia considerablemente más amplias como se muestra en la tabla 13. Esto indica que las pendientes más pronunciadas abarcan una proporción significativa del área bajo estudio, lo que sugiere la posibilidad de que sean zonas de mayor riesgo en términos de terreno accidentado y posibles deslizamientos. Este hecho insinúa que las áreas con pendientes pronunciadas se extienden considerablemente, lo que podría plantear desafíos sustanciales en relación con la seguridad vial y el bienestar de los residentes cercanos. Estos lugares podrían estar más expuestos a problemas de estabilidad del terreno y erosión, lo que a su vez podría afectar la viabilidad de las actividades constructivas y el uso del suelo.

Así mismo, la zona presenta alta densidad en material vegetal, caracterizándose el cultivo de palma de bambú y altos sistemas rocosos, como se muestra a continuación.

Figura 46. Fisiografía zona 1, sector peaje La Punta



Figura 47. Fisiografía zona 2, sector peaje La Punta



Figura 48. Fisiografía zona 3, sector peaje La Punta



Figura 49. *Fisiografía zona 4, sector peaje La Punta*

4.3.1.2 Geología. En cuanto a la geología, se han encontrado sitios arqueológicos que dan cuenta de la presencia de culturas prehispánicas en la región [35]. En esta zona se encontraron tres tipos de unidades estratigráficas (ver figura 50), describiéndose sus unidades geológicas como:

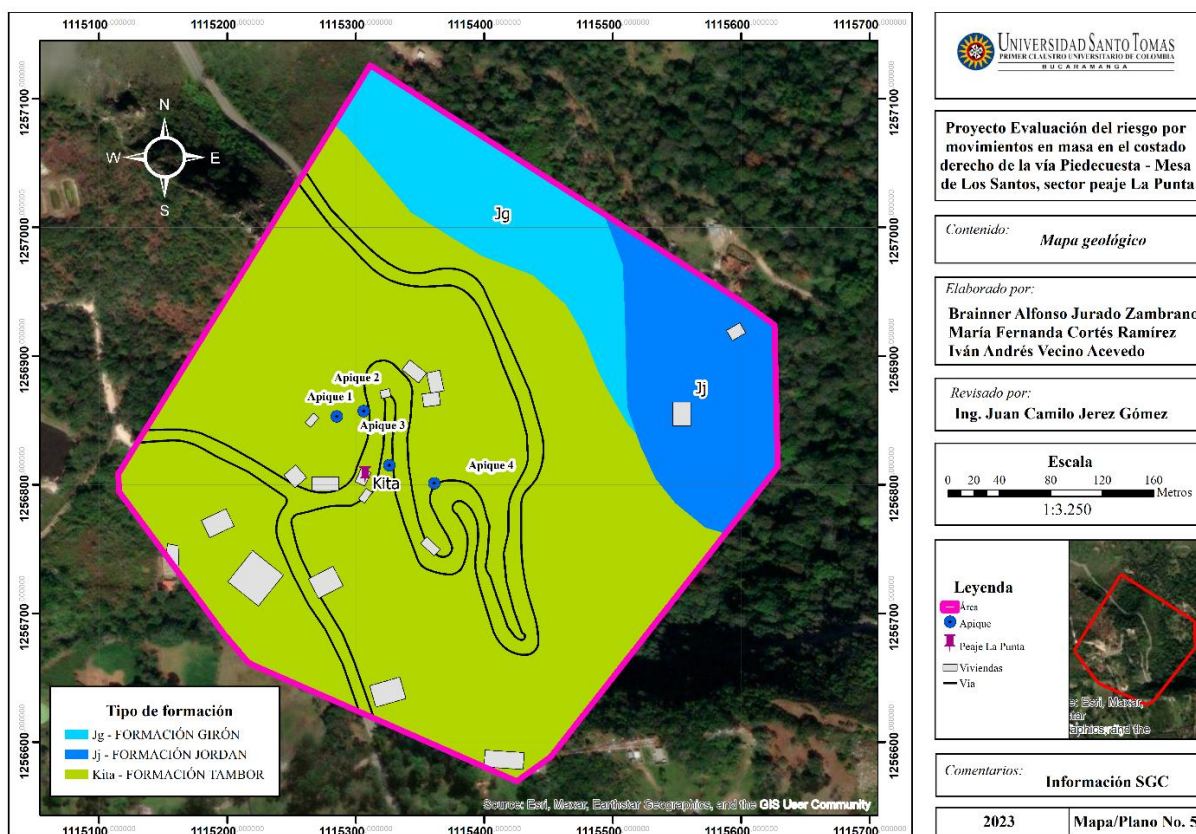
Formación tambor (Kita) - También conocida como formación Los Santos, de acuerdo con nuestro análisis en el laboratorio de rocas de las muestras extraídas, se evidenció que presentan areniscas cuarzosas, de color claro en capas, cómo también se presentan limolitas y areniscas pardas rojizas conglomeráticas. Esta formación se encuentra dentro del conjunto de rocas ígneas formadas durante el período del Mesozoico Cretáceo inferior [26], toda esta información se pudo corroborar con los datos del Servicio Geológico Colombiano. La incidencia de esta formación en el área estudiada es del 75,8%.

Formación Girón (Jg) - Formación constituida por areniscas conglomeráticas y conglomerados, de colores gris amarillento a pardo rojizo, masivos y lenticulares; cómo también existe presencia de limolitas pardas rojizas. Estos depósitos se formaron en el periodo Mesozoico

Jurásico y pertenece al grupo de rocas ígneas [26]. Esta formación tiene una presencia del 13,1% en la zona de estudio.

Formación Jordán (Jj) - Corresponde a depósitos acumulados durante el periodo Mesozoico Triásico, perteneciente al grupo de rocas ígneas, constituidas por limolitas, areniscas de grano fino, de color pardas rojizas con un poco de calcárea en las partes más duras de las rocas [26]. La formación Jordán tiene una presencia en la zona de estudio del 11,1%.

Figura 50. Mapa geológico de la zona de estudio



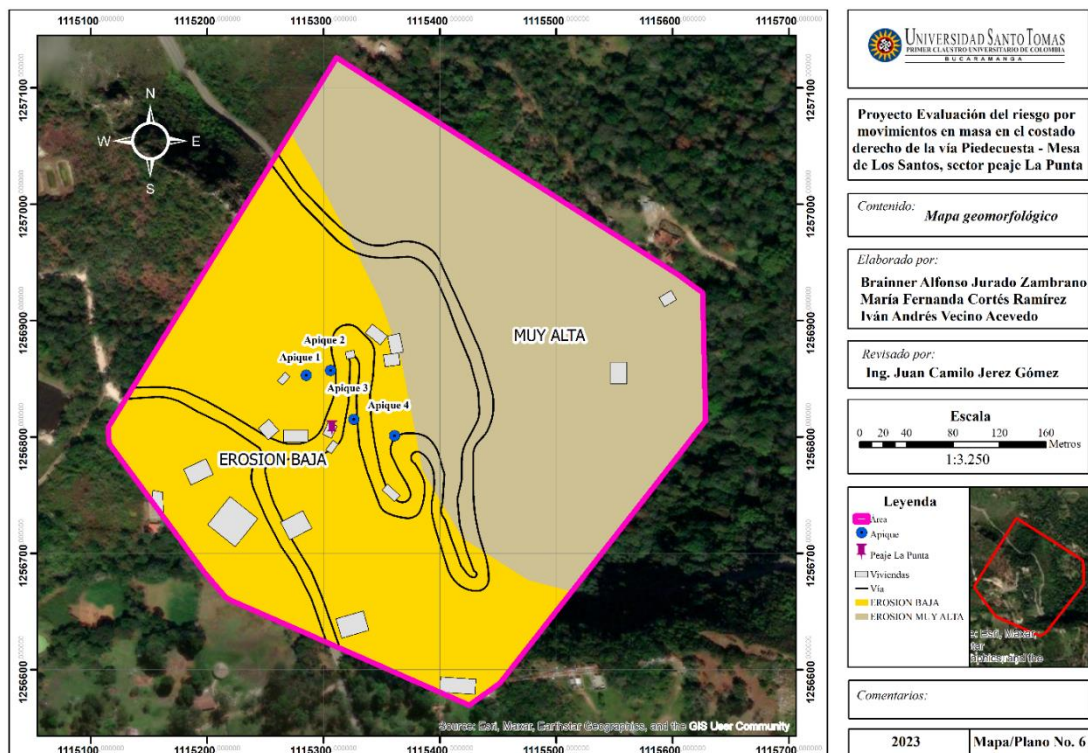
Adaptado de [26].

4.3.1.3 Geomorfología. La geomorfología de la región de estudio se ha observado que se presenta un nivel bajo de erosión en la zona donde se llevaron a cabo los apiques. El área afectada

por esta forma de erosión abarca unos 8771.98 m² (ver figura 51). Aquí, se pueden identificar sectores con pendientes moderadas, oscilando entre el 0% y 50%. Además, se ha notado la presencia de erosión laminar en algunas colinas, que se clasifican como terrenos estables, caracterizados por la expansión de bosques de bambú.

Por otro lado, la zona bajo análisis también exhibe una erosión significativamente alta, abarcando aproximadamente 8566.57 m². Este fenómeno es causado por la intensa fracturación de los macizos rocosos y una elevada meteorización mecánica. Este proceso de descomposición física se ve agravado debido a los procesos erosivos asociados con la remoción en masa que se manifiesta en esa área.

Figura 51. Mapa geomorfológico de la zona de estudio

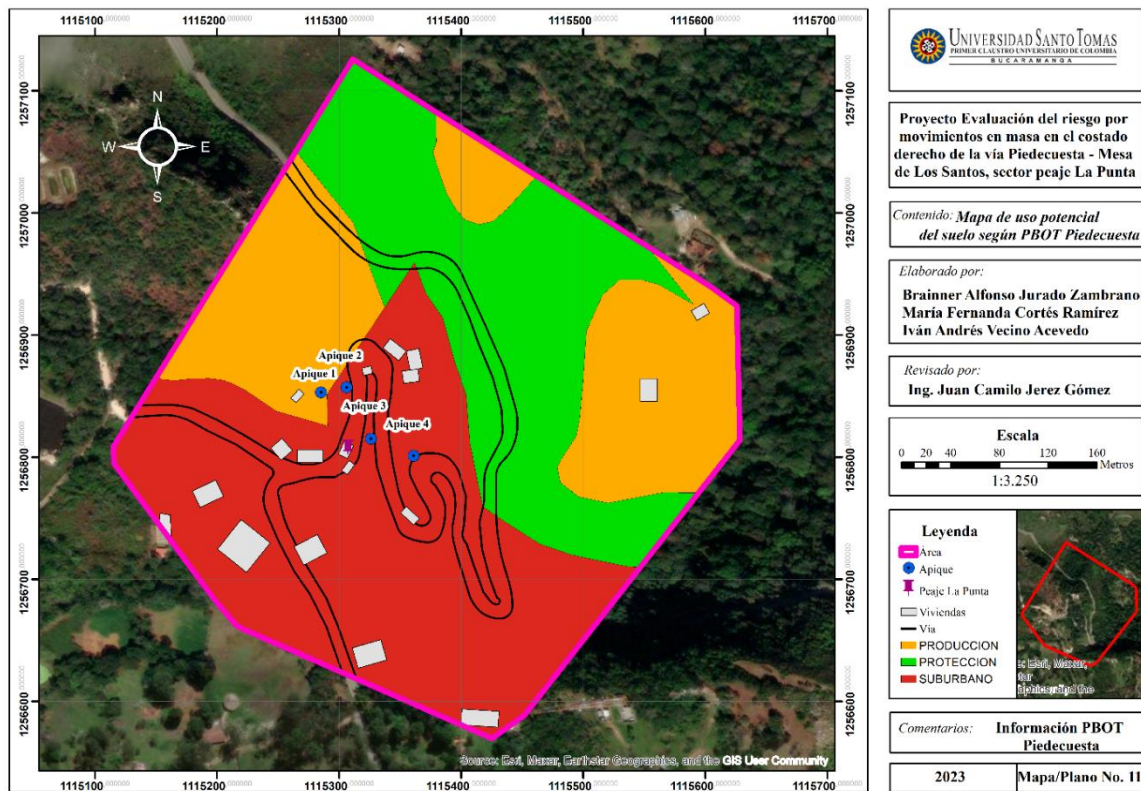


4.3.1.4 Edafología. La edafología del sector del peaje La Punta, está conformada por areniscas ligeramente lodosas de acuerdo con los resultados obtenidos en el laboratorio de rocas, cuyas características que se presentan con de carácter esféricas, redondez entre angular a redondeado, con Inter partículas porosas y armazón entre grano y lodo soportado a intermedio.

4.3.1.5 Suelo. De acuerdo con los ensayos de laboratorio, la zona presenta un suelo areno limoso (SM), donde las características de este tipo de suelo suelen ser muy compactos. Es resistente al agua por más tiempo que otros suelos, así como los nutrientes. Su coloración es principalmente marrón oscuro. Los limos se caracterizan por ser una especie de lodo o barro ya que tienen contenido de arena muy delgada y arcilla.

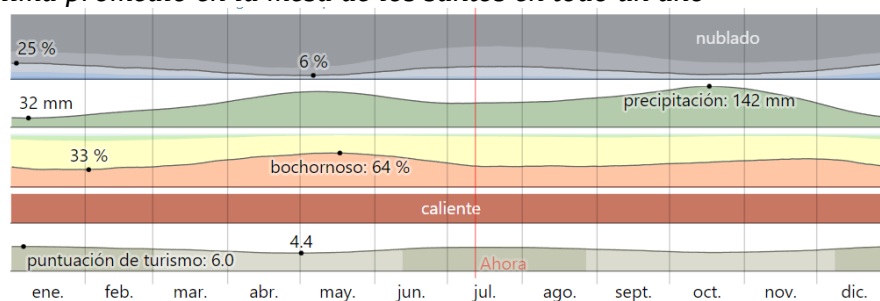
Por otro lado, según el PBOT de Piedecuesta, el sector presenta tres tipos de uso del suelo (ver figura 52), los cuales son los siguientes:

- Suelo de producción en actividades agropecuarias y agroforestales con una extensión de 2677,58 m².
- Suelo de protección con un área de incidencia de 5914,03 m² debido a que es una zona de alta amenaza por remoción en masa.
- Suelo suburbano con una extensión de 9352,59 m², justamente donde está localizado el peaje La Punta y gran parte de los apiques realizados.

Figura 52. Mapa de uso potencial del suelo según PBOT Piedecuesta de la zona de estudio

Adaptado de [25].

4.3.1.6 Clima. En las bases de datos climatológicas de Weather Spark, en la Mesa de Los Santos, la temperatura en todo el año varía entre los 19 °C y 26 °C, muy rara vez se encuentra por debajo de los 17 °C o por encima de los 28 °C.

Figura 53. Clima promedio en la mesa de los santos en todo un año

Adaptado de [37].

Por otro lado, la época del año en donde se presenta mayor temperatura se presenta entre julio y septiembre con una temperatura máxima de 25 °C. Desde octubre a diciembre la temperatura máxima promedio diaria es menor a 25 °C según las bases de datos de Weatherspark.

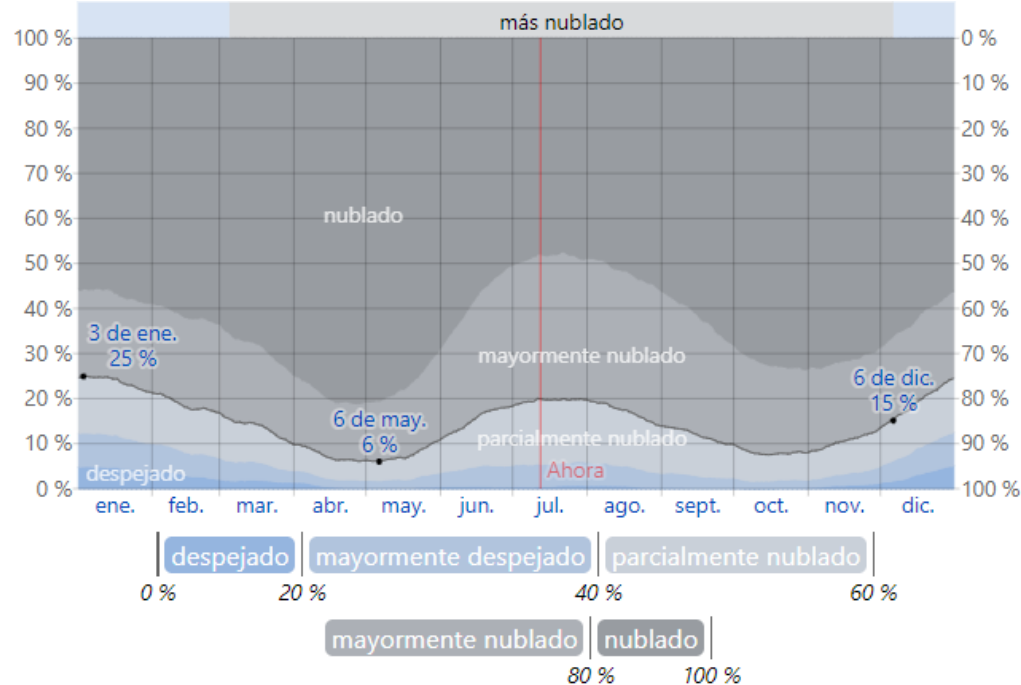
Tabla 14. *Temperatura máxima y mínima en la Mesa de Los Santos en todo un año*

Promedio	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sept.	oct.	nov.	dic.
Máxima	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	25 °C	24 °C	25 °C
Temp.	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	22 °C	21 °C	21 °C	21 °C
Mínima	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C	19 °C

Adaptado de [37].

Nubes – La nubosidad en la Mesa de Los Santos se presenta parcialmente nublado un 24% del tiempo de enero, en marzo hasta diciembre la nubosidad corresponde a un 93% del tiempo, es decir, se encuentra mayor mente nublado como se indica en las bases de datos de Weatherspark.

Figura 54. *Cobertura de las nubes en la Mesa de Los Santos*

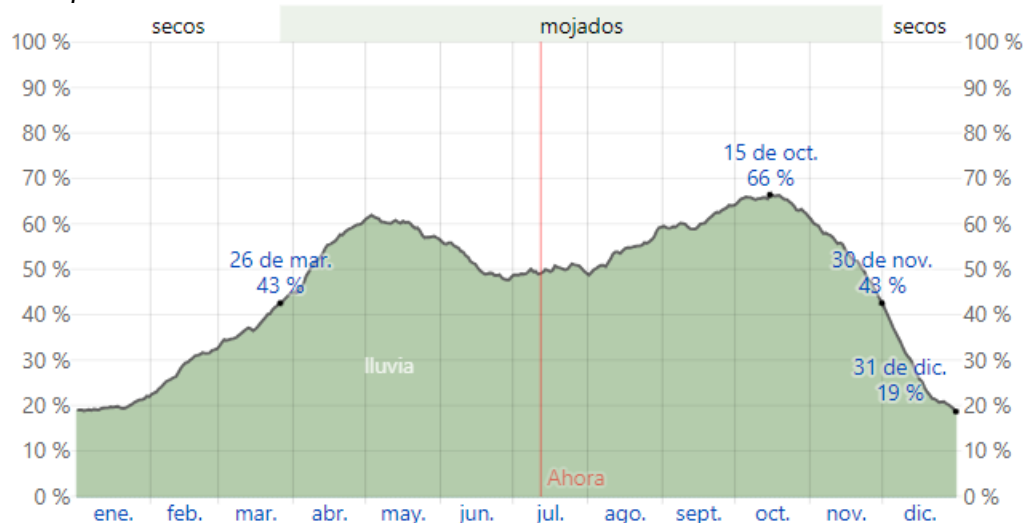


Adaptado de [37].

Precipitación – “La temporada más mojada dura 8,1 meses, de 26 de marzo a 30 de noviembre, con una probabilidad de más del 43 % de que cierto día será un día mojado. El mes con más días mojados en Los Santos es octubre, con un promedio de 20,1 días con por lo menos 1 milímetro de precipitación” [37].

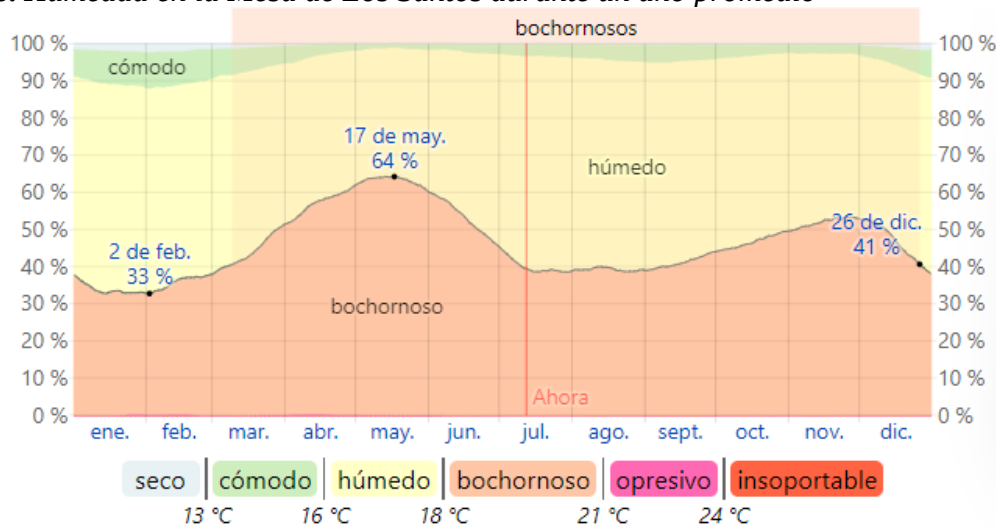
“La temporada más seca dura 3,9 meses, del 30 de noviembre al 26 de marzo. El mes con menos días mojados en Los Santos es enero, con un promedio de 6,1 días con por lo menos 1 milímetro de precipitación” [37].

Figura 55. Precipitación en la Mesa de Los Santos en el año



Adaptado de [37].

De la anterior figura, se puede observar que el mes con más lluvia corresponde a octubre con un promedio de 142 milímetros de lluvia, mientras que en enero se presenta el mes con menos lluvia el cual corresponde a 33 milímetros de lluvia.

Figura 56. Humedad en la Mesa de Los Santos durante un año promedio

Adaptado de [37].

4.3.1.7 Hidrografía. Según el informe de la Sociedad Geográfica de Colombia de la Academia Santandereana de la historia de la mesa de los santos, las vertientes hidrográficas presentes son: quebradas, zanjones y arroyos, en la parte occidental cuyas aguas van íntegramente al Sogamoso. Las fuentes que nutren los tres ríos que recogen el líquido de la Mesa corresponde al Chicamocha, Sogamoso y Río de Oro.

Zanjón de la Aguadorda, desarrollo alrededor de 8km, presenta un curso muy accidentado con abismos entre las cotas 800 y 700.

Zanjón de la Chivatera, el afluente principal es el zanjón de la Dañina, generalmente se encuentra bajo de agua, corresponde a 6km de longitud y caídas violentas por lomas y cortes descubiertos.

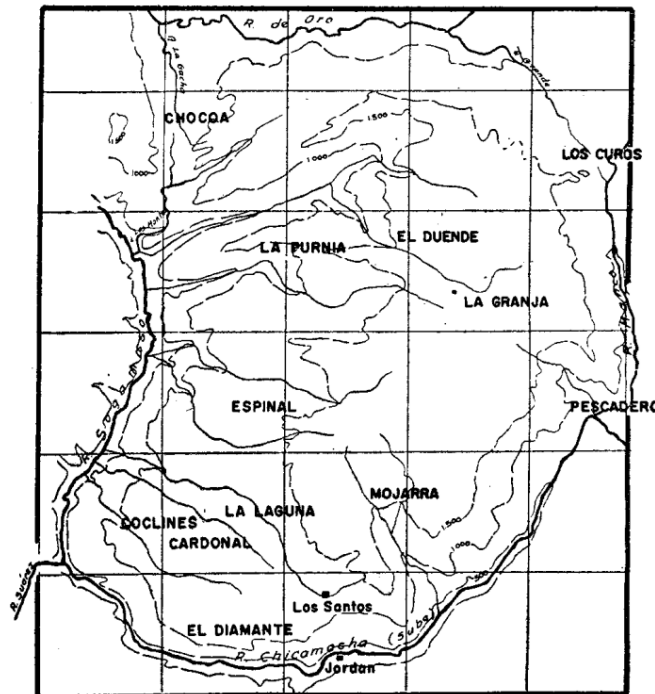
Quebrada de Chiveche, es la más larga de la zona con casi 10km de curso.

Quebrada de los potreros, proviene de la región de las Llanadas y un poco más arriba del afluente de la quebrada de la Custodia.

Quebrada del Angelino, recógelas aguas de las lomas y peñas de Congelo formando un gran entrante.

Quebrada de los Fríos, es la quebrada más importante y de mayor caudal estable, presenta el salto de El Duende.

Figura 57. *Afluentes alrededor de la Mesa de Los Santos*



Tomado de [36, p. 8].

4.3.1.8 Actividad económica. En el informe de la Sociedad Geográfica de Colombia de la Academia Santandereana de la historia de la Mesa de Los Santos se menciona que antiguamente la Mesa estuvo recubierta por árboles de quina, los cuales ya se encuentran muy pocos debido a que son talados para ser empleados como leña. En los cursos de las quebradas se encuentran presencia de antiguos bosques como en El Roble y en la sección noreste de la Mesa de Los Santos. Esta destrucción provocó el agotamiento y exterminio del manto arborescente generando

consecuencias en el suelo, en su capa más rica, el humus, el cual es producto de descomposición de residuos vegetales, hojas, ramas, semillas y plantas que con las quemadas han desaparecido en gran cantidad [36, p. 9].

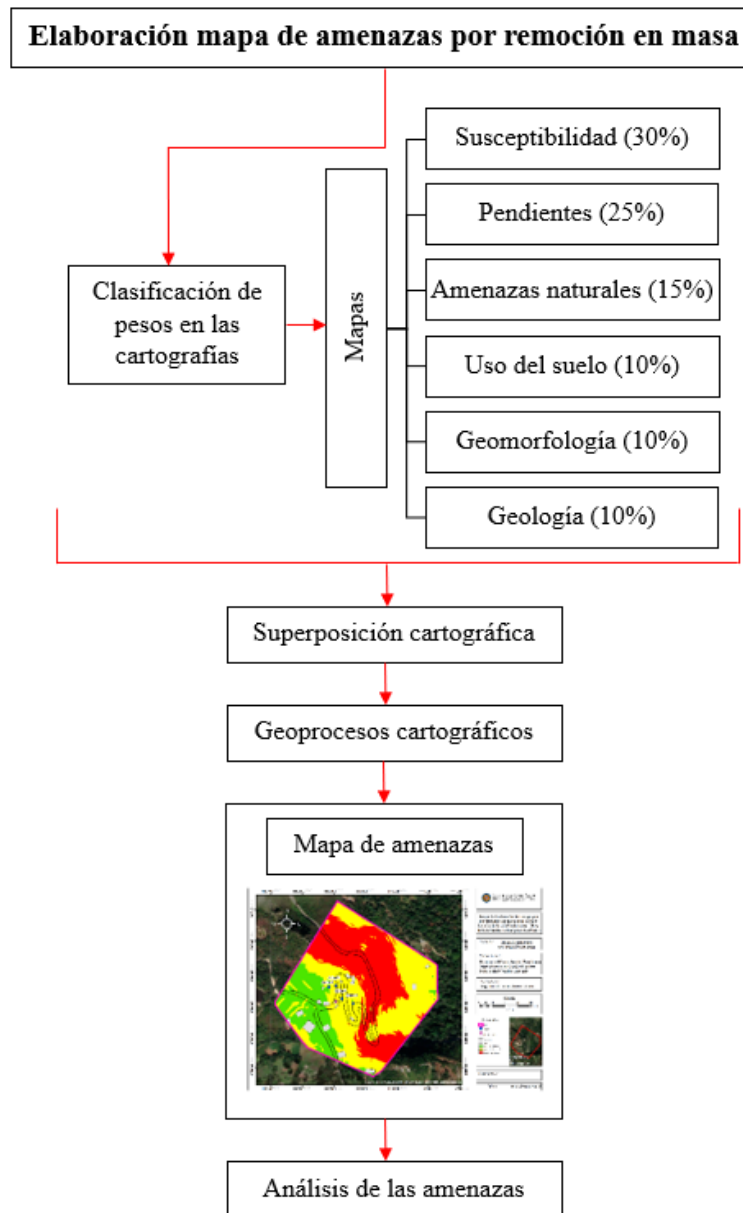
Por otro lado, se ha intentado el cultivo de árboles frutales, los cuales han sido fracasados debido a que las raíces no logran desarrollarse por completo para nutrir las plantas al momento de alcanzar el suelo duro, pedregoso. En las partes más horizontales de la Mesa de Los Santos se guarda mejor el suelo, la tierra fecunda [36, p. 10].

“Las vertientes de la Mesa son más estériles y pobres en capa vegetal a excepción de la parte nortea y noroccidental, las cuales están fuertemente erosionadas y desnudas dejando al descubierto la roca” [38].

La agricultura en la Mesa constituye a la exportación de tabaco, maíz, fique y café. Las condiciones de cultivo son difíciles según se indica en el informe de la Sociedad Geográfica de Colombia de la Academia Santandereana de la historia de la Mesa de Los Santos.

4.3.2 Elaboración de mapas de amenaza, vulnerabilidad y riesgo

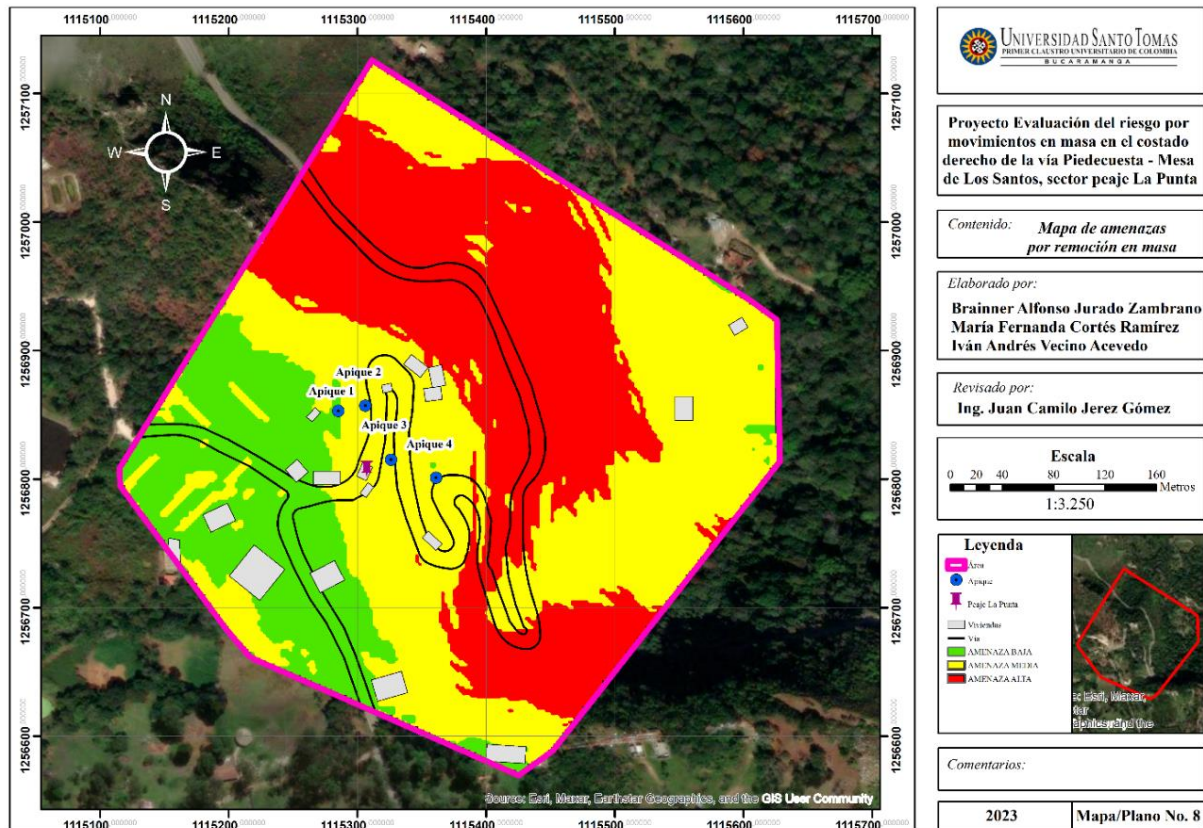
4.3.2.1 Análisis de las amenazas. Según el Servicio Geológico Colombiano (SGC) apoyado con el Decreto 1807 de 2014, las áreas que están sujetas a estudios de vulnerabilidad y de riesgo son aquellas zonas ya ocupadas que se identificaron en la categoría de amenaza alta y aquellas identificadas en amenaza media, por esta razón para este proyecto se realizan los estudios ya mencionados complementado con la información del PBOT de Piedecuesta. Para llevar a cabo el mapa de amenazas por remoción en masa de la zona de estudio se realizó el procedimiento de la figura 58.

Figura 58. Procedimiento para la elaboración del mapa de amenazas por remoción en masa

El procedimiento exhibe la creación del mapa de amenazas a través de la implementación de geoprocesos y la superposición cartográfica. Estos procesos incorporaron datos geológicos, geomorfológicos, de pendientes, amenazas naturales y susceptibilidad en un Sistema de Información Geográfica, específicamente en el software ArcGIS (ver Figura 59). La asignación de pesos a las diversas variables temáticas, como geomorfología, geología, susceptibilidad, amenazas

naturales, pendientes y usos del suelo, se basó en el enfoque metodológico presentado por el IDEAM. Este instituto es reconocido por su experiencia en la zonificación de susceptibilidad y amenazas relacionadas con movimientos en masa [48].

Figura 59. Mapa de amenazas por remoción en masa de la zona de estudio



Se definió que la zona del peaje La Punta tiene una amenaza moderada a causa de sus pendientes pronunciadas entre el 25% y 57%, sin embargo, la zona baja de la vía presenta una amenaza alta por remoción en masa debido a que sus pendientes son superiores al 75%; su erosión es muy alta y el modelo geológico – geotécnico mostró susceptibilidad alta en zonas de alta pendiente; a su vez, se observa que las estructuras y parte de la vía que se encuentran en la zona que está de color verde contemplan una amenaza baja debido a que la susceptibilidad y las pendientes de esa zona son mínimas, también por el tipo de suelo que presenta y su geomorfología.

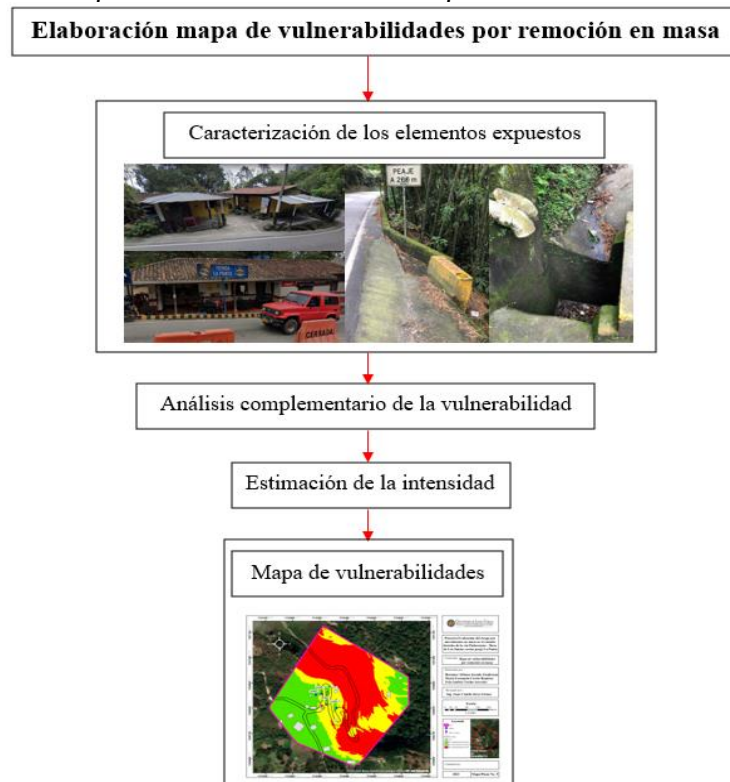
Por otro lado, las estructuras y parte de las curvas de la carretera que se encuentran en la parte de color amarillo están en una amenaza media. Las proporciones que se pudieron determinar en el mapa respecto a los niveles de amenaza son los siguientes:

Tabla 15. *Niveles de amenaza en la zona de estudio*

Nivel	Porcentaje	Área (m ²)
Bajo	18.05%	3129
Medio	45.16%	7830.08
Alto	36.79%	6379.48

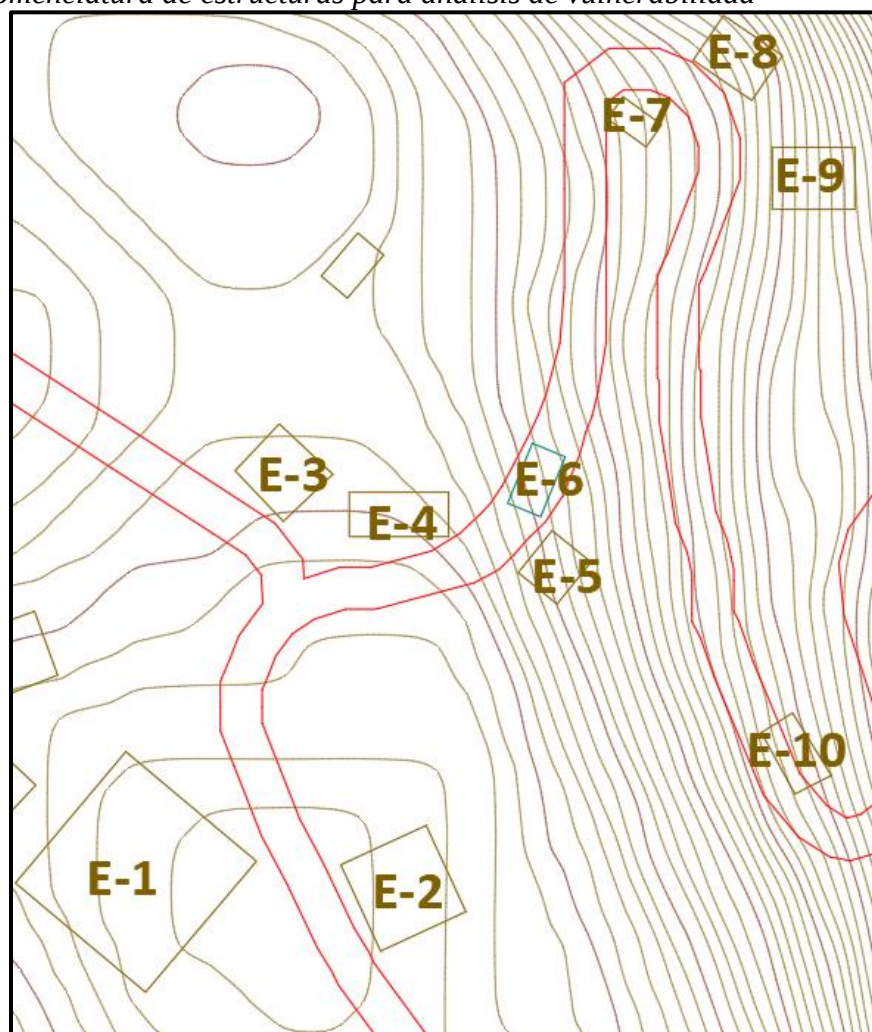
4.3.2.2 Análisis de vulnerabilidades. Definido en el capítulo anterior que la zona de estudio es de amenaza media, se procedió a estudiar la vulnerabilidad mediante el procedimiento planteado en la siguiente figura.

Figura 60. *Procedimiento para la elaboración del mapa de vulnerabilidad*



La Guía del SGC para la Gestión del Riesgo, la vulnerabilidad tiene varios enfoques, de los cuales para el análisis de este proyecto se dará prioridad al físico, procediendo a recopilar información de manera cualitativa sobre las condiciones de las estructuras que se encuentran cercanas a las zonas donde fueron tomadas las muestras de suelo y roca del área de estudio (ver figura 61).

Figura 61. *Nomenclatura de estructuras para análisis de vulnerabilidad*



Se identifican viviendas, tiendas, un puesto de vigilancia y el peaje, estas estructuras se nombraron con la letra E y para las estructuras públicas se identificaron con las letras EP como se ve a continuación en las siguientes figuras.

Figura 62. Estructura E-1

Adaptado de [39].

Figura 63. Estructura E-2

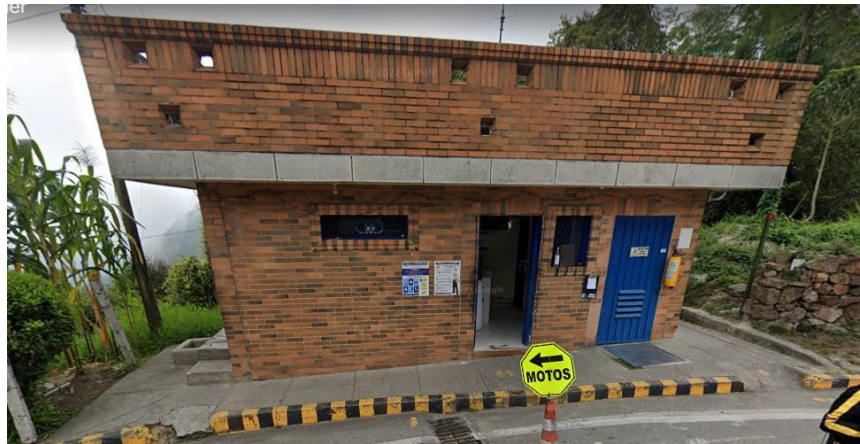
Adaptado de [39].

Figura 64. Estructura E-3

Adaptado de [39].

Figura 65. Estructura E-4

Adaptado de [39].

Figura 66. Estructura E-5

Adaptado de [39].

Figura 67. Estructura E-6

Adaptado de [39].

Figura 68. Estructura E-7

Adaptado de [39].

Figura 69. Estructura E-8 y E-9

Adaptado de [39].

Figura 70. Estructura E-10

Adaptado de [39].

Figura 71. Estructura pública EP-1, carretera**Figura 72.** Estructura pública EP-2, drenajes

Ya teniendo definidas las estructuras, se procedió a realizar la tipificación de estas utilizando el método planteado por Leone [40] el cual propone que mediante la observación de campo, se haga una calificación subjetiva determinada por la experiencia del evaluador, para este proyecto se definieron como criterios para la tipificación el tipo de uso de la estructura, su número de pisos, qué tanta antigüedad tenga, si ha tenido mantenimiento y cuál material predomina en su construcción, por lo cual se obtuvieron las tablas 16 y 17.

Tabla 16. *Tipificación de las estructuras alrededor en la zona de estudio*

Estructura	Tipo	No. de pisos	Edad	Mantenimiento	Materiales
E-1	Vivienda	1	2014	Sí	Mampostería confinada
E-2	Zona comercial	2	2014	Sí	Hormigón
E-3	Tienda	1	2014	No	Mampostería confinada
E-4	Tienda	1	2014	Sí	Mampostería confinada
E-5	Puesto de vigilancia	2	2014	Sí	Mampostería confinada
E-6	Peaje	2	2004	Sí	Mampostería confinada
E-7	Vivienda	1	2014	No	Mampostería no confinada
E-8	Tienda	2	2014	No	Mampostería confinada
E-9	Vivienda	1	2014	No	Mampostería no confinada
E-10	Vivienda de uso mixto	1	2014	No	Mampostería no confinada

Tabla 17. *Tipificación de las estructuras públicas*

Estructura	Tipo	Número de pisos	Edad	Mantenimiento	Materiales
EP-1	Carretera	1	2014	Sí	Pavimento
EP-2	Drenajes	1	2014	Sí	Hormigón

Como se puede observar en la tabla 16, para la edad de las estructuras se contempló como 2014 para la mayoría de las estructuras puesto que no se encontró más información sino hasta ese año, por lo cual no se pudo determinar la edad real ya que algunas estructuras se veían con mantenimiento previo como se observa en la figura E-1, también se observa que las estructuras E-7 y E-8 son las que se encuentran más deterioradas notándose que mayormente es debido a la humedad de la zona; referente a las estructuras públicas siendo la carretera y los drenajes estos se ven sin mantenimiento continuo sobre todo los drenajes notándose su deterioro en la figura 72.

Ya teniendo la tipificación de las estructuras, se procede a clasificarlas como tipo B1 como edificación no confinada de muy mala calidad y materiales reciclables o no aprobados por la normatividad siendo construcciones de mala calidad, sin fundaciones o sistema estructural definido; B2 aquellas edificaciones no confinadas de mala calidad, las cuales no tiene refuerzo estructural ni fundaciones adecuadas de las cuales se encuentra la mampostería no confinada y la

tapia pisada; B3 son las edificaciones confinadas de regular a buena calidad, las cuales tienen la capacidad de disipar movimientos encontrando estructuras con mampostería confinada, porticadas, semiporticadas y con un sistema estructural resistente; las B4 son las estructuras sismorresistentes siendo de muy buena calidad, construidas por ingenieros y con cumplimiento de la normatividad que para este caso, en Colombia se maneja la NSR-10 [40]; ya finalmente las R1 son aquellas estructuras que también siguen la normatividad, siendo estructuras públicas como las carreteras.

Tabla 18. *Clasificación de la estructura mediante el tipo de edificación*

Estructura	Tipo de edificación	Descripción
E-1	B3	EDIFICACIÓN CONFINADA DE BUENA CALIDAD
E-2	B3	EDIFICACIÓN CONFINADA DE BUENA CALIDAD
E-3	B3	EDIFICACIÓN CONFINADA DE BUENA CALIDAD
E-4	B3	EDIFICACIÓN CONFINADA DE BUENA CALIDAD
E-5	B4	EDIFICACIÓN SISMO RESISTENTE
E-6	B4	EDIFICACIÓN SISMO RESISTENTE
E-7	B1	EDIFICACIÓN NO CONFINADA DE MUY MALA CALIDAD Y MATERIALES RECICLABLES
E-8	B1	EDIFICACIÓN CONFINADA DE BUENA CALIDAD
E-9	B3	EDIFICACIÓN NO CONFINADA DE MALA CALIDAD
E-10	B2	EDIFICACIÓN NO CONFINADA DE MALA CALIDAD

Tabla 19. *Clasificación de la estructura pública mediante el tipo de edificación*

Estructura	Tipo de edificación	Descripción
EP-1	R1	VÍA
EP-2	B4	EDIFICACIÓN SISMO RESISTENTE

Para la clasificación de vulnerabilidad física por deslizamiento se tuvo en cuenta la velocidad típica propuesta por rangos según Cruden y Varnes donde según la descripción de la rapidez del movimiento del deslizamiento se encuentra la clase de velocidad [41, p. 10], ya después de definirla se realizó la categorización, que según Leone [40], establece tres tipos de

vulnerabilidades: baja, media y alta, de las cuales depende del índice de vulnerabilidad física (IVF) el cual es determinado cualitativamente.

El índice de vulnerabilidad se realiza mediante la matriz de daño desarrollada por Cruden y Varnes [41]. Esta evaluación depende de la tipificación de cada estructura y la clase que tiene según su velocidad típica, lo que permite la obtención del Índice de Vulnerabilidad Física (I.V.F) donde la categoría I tiene un rango entre 0.0 y 0.2, esta pertenece a daños ligeros no estructurales y la estabilidad no es afectada; II con un rango entre 0.2 y 0.4 representa fisuras en paredes y no urgen reparaciones, III el cual se encuentra en un rango entre 0.4 y 0.7 representa deformaciones importantes y daños estructurales, IV con un rango entre 0.7 y 0.9, es cuando se presentan fracturas en la estructura por lo cual se debe evacuar inmediatamente; finalizando con la categoría V con un rango entre 0.9 y 1.0 que es cuando existe derrumbe parcial o total de la estructura.

Tabla 20. *Clasificación de vulnerabilidad física, evento de deslizamiento*

Estructura	Tipificación	Tipo de solicitud	Índice de daño	I.V.F.	Categorización
E-1	B3	VM5	II	0.3	Vulnerabilidad baja
E-2	B3	VM5	II	0.3	Vulnerabilidad baja
E-3	B3	VM5	II	0.3	Vulnerabilidad baja
E-4	B3	VM5	II	0.3	Vulnerabilidad baja
E-5	B4	VM2	IV	0.7	Vulnerabilidad media
E-6	B4	VM2	IV	0.7	Vulnerabilidad media
E-7	B1	VM4	IV	0.7	Vulnerabilidad media
E-8	B3	VM2	IV	0.7	Vulnerabilidad media
E-9	B2	VM3	IV	0.7	Vulnerabilidad media
E-10	B2	VM3	IV	0.7	Vulnerabilidad media

Tabla 21. *Clasificación de vulnerabilidad física en estructuras públicas*

Estructura	Tipificación	Tipo de solicitud	Índice de daño	I.V.F.	Categorización
EP-1	R1	VM2	IV	0.7	Vulnerabilidad media
EP-2	B4	VM2	IV	0.7	Vulnerabilidad media

Para las estructuras E-1 y E-2, su velocidad típica se manejó una clase tipo VM5 debido a que se encuentran en una zona donde no hay demasiada pendiente, lo que resulta en una velocidad de deslizamiento más baja en comparación con las estructuras situadas debajo del peaje. Estas últimas se caracterizan por pendientes más pronunciadas y la presencia del talud.

En general la mayoría de las estructuras presentan un nivel de vulnerabilidad moderado. Sin embargo, se observa una excepción en las estructuras E-7 y E-9, donde la vulnerabilidad alcanza su nivel máximo. Esto se debe al tipo de edificación, materiales empleados en su estructura y procedimiento constructivo, el cual se puede evidenciar un poco su deterioro en las imágenes capturadas por Google Earth (figura 58 y 60).

Para determinar el tipo de sollicitación por empujes laterales de las estructuras se determina igual que por deslizamiento con ayuda de la categorización de Cruden y Varnes, la diferencia es en el tipo de sollicitación, el cual no depende de la velocidad del deslizamiento, si no que, de la presión lateral, las cuales pueden ser PL1, PL2 o PL3, siendo:

PL1 = Mayor a $\frac{2}{3}$ de la altura de la vivienda.

PL2 = Entre $\frac{1}{3}$ y $\frac{2}{3}$ de la altura de la vivienda.

PL3 = Menor a $\frac{1}{3}$ de la altura de la vivienda.

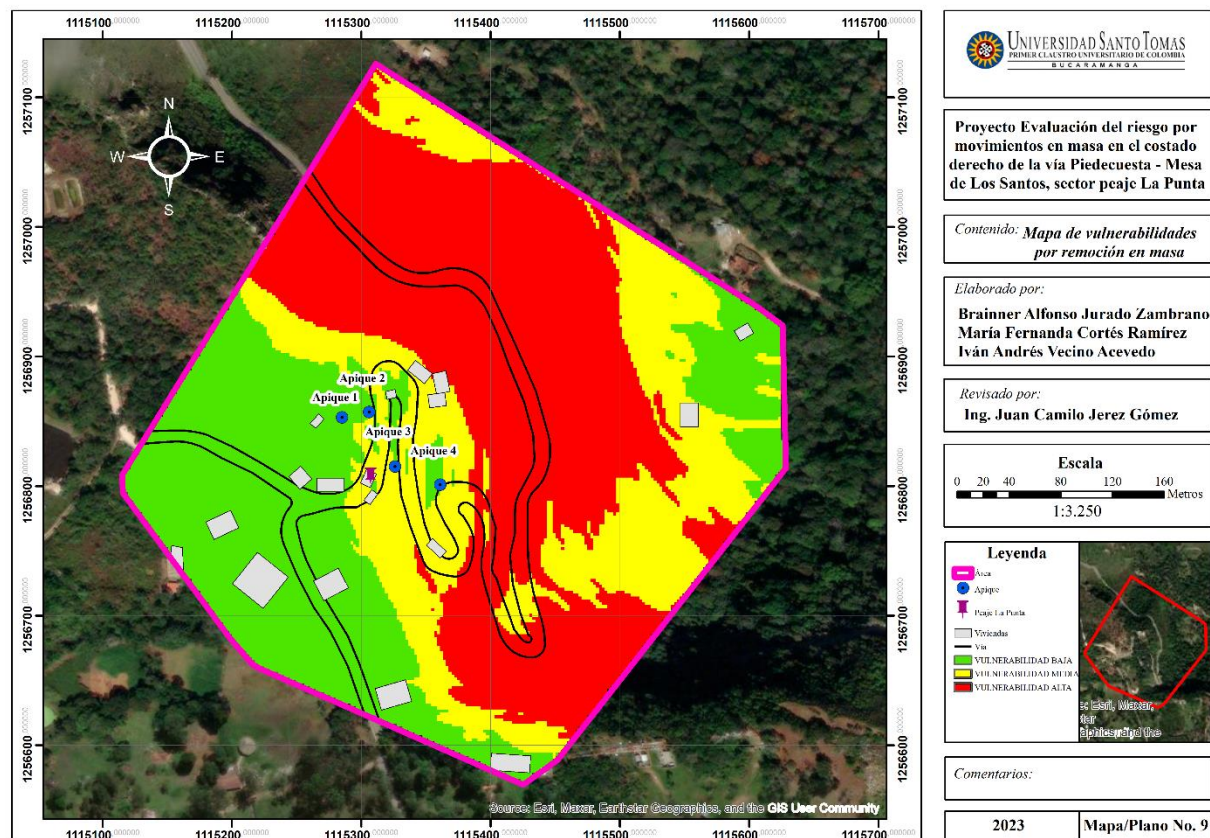
Tabla 22. *Clasificación de vulnerabilidad física, evento de empujes laterales*

Estructura	Tipificación	Tipo de sollicitación	Índice de daño	I.V.F.	Categorización
E-1	B3	PL3	II	0.3	Vulnerabilidad baja
E-2	B3	PL3	II	0.3	Vulnerabilidad baja
E-3	B3	PL3	II	0.3	Vulnerabilidad baja
E-4	B3	PL3	II	0.3	Vulnerabilidad baja
E-5	B4	PL2	II	0.4	Vulnerabilidad media
E-6	B4	PL2	II	0.4	Vulnerabilidad media
E-7	B1	PL3	IV	0.7	Vulnerabilidad media
E-8	B3	PL1	III	0.7	Vulnerabilidad media
E-9	B2	PL3	IV	0.7	Vulnerabilidad media
E-10	B2	PL2	IV	0.7	Vulnerabilidad media

La clasificación por vulnerabilidad física mediante empujes laterales es similar a la categorización basada por deslizamientos, además de corroborar los datos con el mapa de vulnerabilidad por remoción en masa, se destaca una prevalencia de vulnerabilidad moderada en la mayoría de las áreas, excepto en el caso de E-1 y E-2 que presentan una vulnerabilidad física baja, por lo cual estas estructuras son las menos propensas a sufrir algún tipo de daño, gracias a su ubicación en la zona de estudio, mientras que las estructuras cercanas al talud incrementan su vulnerabilidad a una categoría media.

La categorización de vulnerabilidad en estructuras públicas se realiza únicamente en el riesgo deslizamiento ya que la evaluación por presiones laterales se aplica únicamente a las viviendas. Las estructuras públicas contemplan una vulnerabilidad de nivel medio, debido a que se encuentran en zonas con mayores pendientes e inferior al talud. Los resultados se respaldan a partir del mapa de vulnerabilidad por remoción en masa, lo que confirma su clasificación en una categoría media.

Planteado lo anterior, se procedió a determinar la vulnerabilidad en todo el territorio analizado mediante el mapa que se observa en la siguiente figura.

Figura 73. Mapa de vulnerabilidades por remoción en masa en la zona de estudio**Tabla 23.** Niveles de vulnerabilidad en la zona de estudio

Nivel	Porcentaje	Área (m ²)
Bajo	30.5%	5289.9
Medio	26.1%	4519.6
Alto	43.4%	7529.1

Mediante el mapa, se determinó que el área de estudio consta de un 30.5% de vulnerabilidad baja, 26.1% media y un 46.4% alta, concordando con el estudio cualitativo realizado ya que según el índice de vulnerabilidad de las estructuras, las que se encuentran en la zona verde tiene vulnerabilidad baja mientras que las que están en la zona amarilla, su vulnerabilidad es media, sin embargo hay una gran extensión en vulnerabilidad alta debido a las altas pendientes, la clasificación del suelo y además, según el PBOT de Piedecuesta se marcan

zonas de protección por actividad de remoción en masa, por ende no existe o no debería existir alguna edificación en la zona que se muestra en rojo en el mapa.

4.3.2.3 Análisis del riesgo. Para determinar el índice de riesgo, se multiplicó la probabilidad de falla y el índice de vulnerabilidad física de deslizamiento y presiones laterales.

Tabla 24. *Índice de riesgo por deslizamientos para estructuras*

Estructura	PF	IVF (Deslizamientos)	IR	Clasificación
E-1	0%	0,3	0	Bajo
E-2	0%	0,3	0	Bajo
E-3	0%	0,3	0	Bajo
E-4	0%	0,3	0	Bajo
E-5	0%	0,7	0	Bajo
E-6	0%	0,7	0	Bajo
E-7	0%	0,7	0	Bajo
E-8	0%	0,7	0	Bajo
E-9	0%	0,7	0	Bajo
E-10	0%	0,7	0	Bajo

Tabla 25. *Índice de riesgo por deslizamientos para estructuras públicas*

Estructura	PF	IVF (Deslizamientos)	IR	Clasificación
EP-1	0%	0,7	0	Bajo
EP-2	0%	0,7	0	Bajo

Puesto que solo se evalúa deslizamiento para las estructuras públicas, no se tuvo en cuenta el índice de riesgo de presiones laterales para estas.

Tabla 26. *Índice de riesgo por presiones laterales para estructuras*

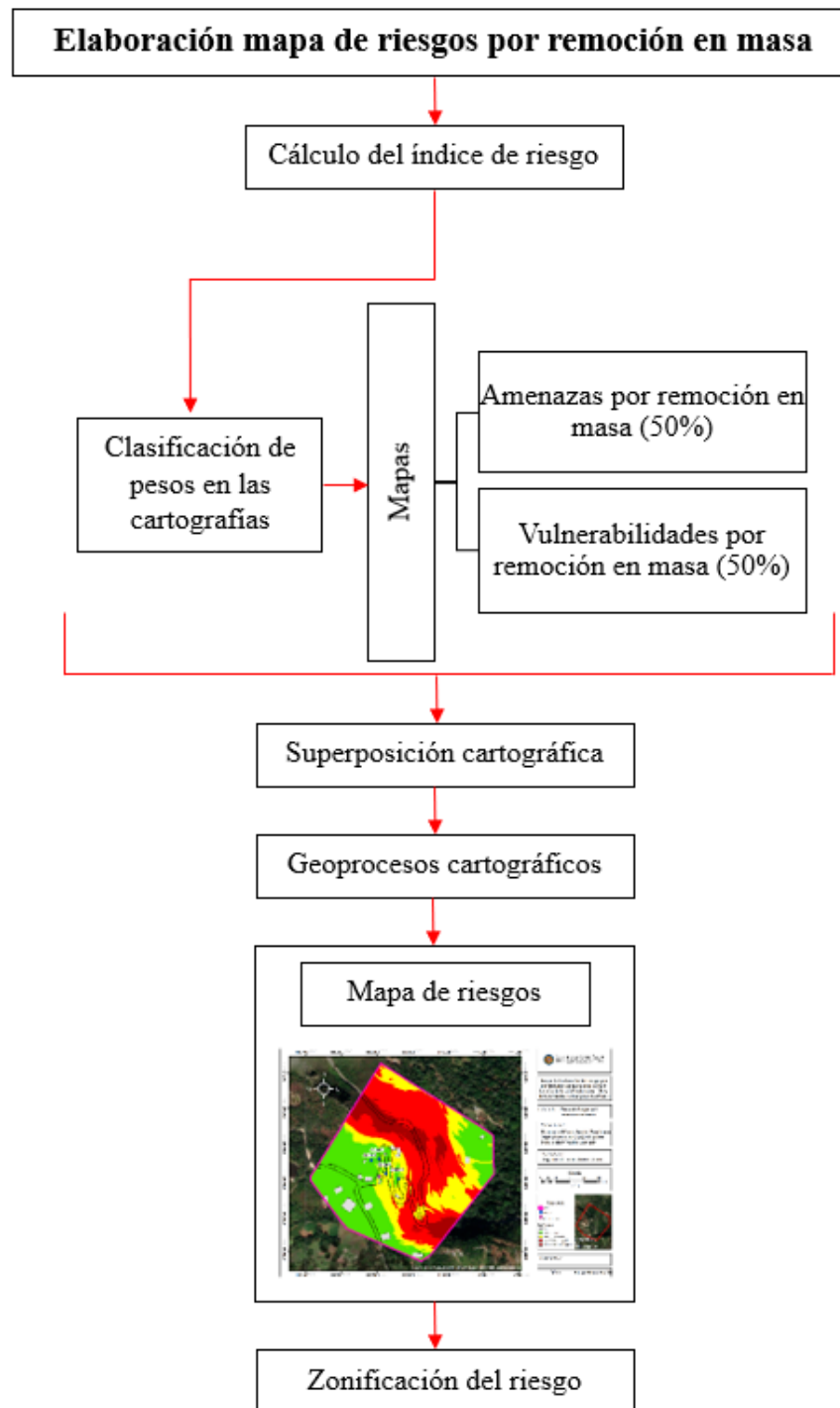
Estructura	PF	IVF (Presiones Laterales)	IR	Clasificación
E-1	0%	0,3	0	Bajo
E-2	0%	0,3	0	Bajo
E-3	0%	0,3	0	Bajo
E-4	0%	0,3	0	Bajo
E-5	0%	0,4	0	Bajo
E-6	0%	0,4	0	Bajo
E-7	0%	0,7	0	Bajo
E-8	0%	0,7	0	Bajo
E-9	0%	0,7	0	Bajo
E-10	0%	0,7	0	Bajo

Tabla 27. *Clasificación del índice de riesgo*

Clasificación	IR
Bajo	≤ 0.15
Medio	$0.15 < IR < 0.27$
Alto	≥ 0.27

Las anteriores tablas reflejan que el índice de riesgo para este proyecto dio como resultado cero para todas las estructuras, esto es debido a que la probabilidad de falla del talud es del 0% según los modelamientos de SLIDE, en otras palabras, el resultado quiere decir que el talud es seguro y no se va a derrumbar además porque según los factores de seguridad cumplen con los planteados por el título H de la NSR-10, ninguno de estos pasa el 1.5 para taludes sin sismo y 1.05 para taludes con sismo, sin embargo, como se pueden ver en los eventos ocurridos en la zona (ver figuras 14, 15, 16, 17, 18 y 19), el riesgo si existe, para índices mayores o iguales a 0.27 se clasifican como altos, los que están entre 0.15 y 0.27 se clasifican como medios y para menores de 0.15 son índices de riesgo bajos, donde esta última aplica para el proyecto.

Obtenido el riesgo, se realizó la zonificación de riesgos por remoción en masa de la zona de estudio mediante un mapa, utilizando el siguiente procedimiento:

Figura 74. Procedimiento para la elaboración del mapa de riesgos por remoción en masa

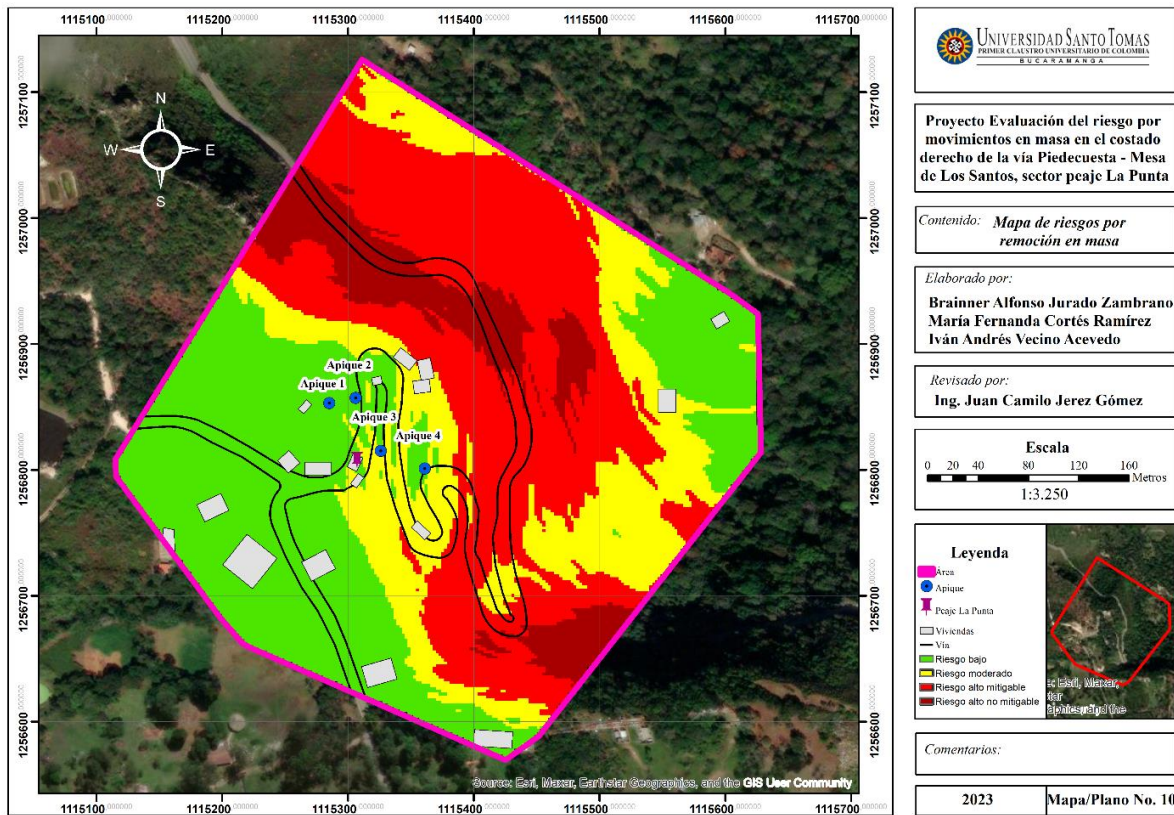
Según la Guía Metodológica y los parámetros anteriormente evaluados, la zonificación del riesgo se determinó en los siguientes niveles:

Tabla 28. *Niveles de riesgo en la zona de estudio*

Nivel	Porcentaje	Área (m ²)
Bajo	34.82%	6037.30
Medio	21.76%	3772.17
Alto mitigable	33.75%	5851.71
Alto no mitigable	9.67%	1662.74

Se puede observar claramente que la categoría de alto riesgo está concentrada en la misma área geográfica que muestra un alto impacto en términos de remoción de masa, según lo indicado en la figura 75, del cual fue considerada también en el análisis de amenazas y vulnerabilidades previamente llevado a cabo. Este nivel se desglosa en riesgo alto mitigable y riesgo alto no mitigable. La última categoría representa un 9.67% de la superficie total y se podría atribuir esta distribución a que, en primer lugar, a las pronunciadas pendientes que superan el 75%. En segundo lugar, se debe a la probabilidad de ocurrencia de eventos adversos con potencial para ocasionar daños considerables, donde resulta inviable o poco práctico aplicar medidas para reducir eficazmente la probabilidad de que tales eventos tengan lugar o para disminuir su impacto.

Por otro lado, el riesgo moderado abarca un 21.76% de la extensión total de la zona estudiada, influido por su proximidad a la región de alto riesgo y a raíz de la vulnerabilidad evidenciada en las estructuras de esa área. En cuanto al riesgo bajo, su origen radica en la baja inclinación del terreno, lo cual desempeña un papel crucial en esta categorización. Además, se suma la naturaleza de la erosión, en línea con la geomorfología característica de la región y un índice de vulnerabilidad mínimamente significativo.

Figura 75. Mapa de riesgos por remoción en masa en la zona de estudio

4.3.3 Acciones de mitigación y prevención por movimientos en masa

Según el título H de la NSR-10, en la tabla H.204-1 donde se determinan los factores de seguridad del terreno, se consideraron dos casos siendo taludes sin sismo con un factor de 1.5 y con sismo con un factor de 1.05, de los cuales, los perfiles modelados en el software SLIDE, deben ser mayores o iguales que estos valores.

Teniendo en claro lo anterior, para los perfiles, SLIDE evaluó 4 métodos para factores de seguridad los cuales son Bishop simplified, Janbu simplified, Spencer y Gle Morgenstern-price. Al examinar los resultados del primer corte sin sismo en la Tabla 8, al calcular el promedio de los cinco métodos previamente mencionados, se obtiene un factor de seguridad de 14. Para el segundo corte sin sismo en la tabla 9, el promedio de los cinco métodos da como resultado un factor de

seguridad de 24. Por lo tanto, ambos cortes cumplen con los estándares en la tabla 5 para taludes en condiciones estáticas, ya que superan el rango de 1.5.

En cambio, el primer y segundo perfil con sismo como se evidencian en la tabla 10 y 11 al hallar el promedio, se obtiene un factor de seguridad de 1.5 y 1.6 cumpliendo con lo establecido en la tabla 5 para taludes con coeficiente sismo de diseño, ya que superan el valor de 1.05, lo que quiere decir que el talud es estable, sin embargo, es importante aclarar que en la zona se han presentado varios eventos de desprendimiento y deslizamiento de pequeños fragmentos de material de suelo y rocoso de la formación Tambor (Kita) como se puede observar en las figuras 15, 16 y 17, que en su mayoría, estos eventos han sido producidos por factores climáticos.

Debido a la problemática de pequeños desprendimientos de material se ve la necesidad de recomendar algunos tipos de sistemas de protección de los taludes de los cuales, la tabla 1.5 del capítulo 1 de Métodos de manejo y estabilización, volumen 1 del libro Deslizamientos (Suárez. J, 2009) propone las siguientes estructuras de control de masas en movimiento:

- *Berma*: Generalmente son económicas y rápidas de construir.

Figura 76. *Berma o banquetta en vías*



Adaptado de [42].

- *Trincheras*: Sirven al mismo tiempo para controlar las aguas lluvia (funcionando un disipador de energía).

Figura 77. *Trincheras en taludes*



Adaptado de [43].

- *Mallas para retención de bloques*: Controlan los bloques de material que pueden generar riesgo.

Figura 78. *Malla para retención de bloques en taludes*



Tomado de [44].

- *Mallas ancladas*: Impiden la caída de los bloques.

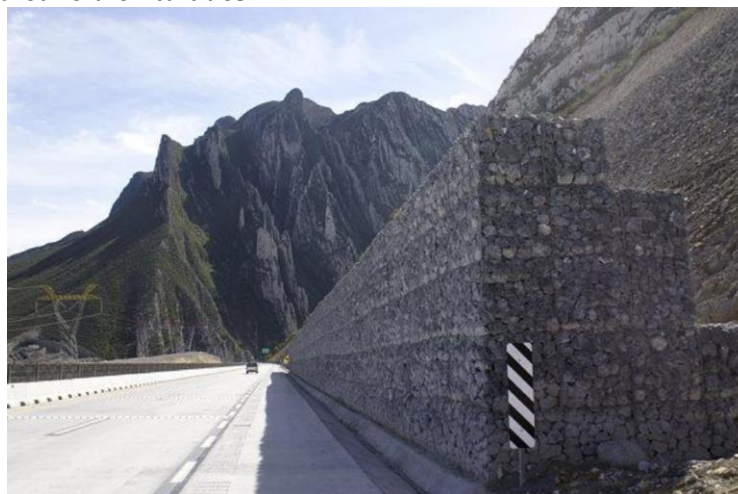
Figura 79. *Mallas ancladas en taludes*



Tomado de [45].

- *Mallas alcancía*: Estos retienen las masas en movimiento.

Figura 80. *Mallas alcancía en taludes*



Tomado de [47].

- *Cubiertas de protección*: siendo uno de los métodos más efectivos para disminuir el riesgo en las vías.

Figura 81. *Cubiertas de protección en taludes*

Tomado de [47].

5. Conclusiones

En el marco de la evaluación del riesgo por movimientos en masa en el costado derecho de la vía Piedecuesta - Mesa de Los Santos, específicamente en el sector del peaje La Punta, se han obtenido resultados valiosos que arrojan luz sobre la compleja interacción entre las características del suelo, la geomorfología del terreno y las estructuras presentes en la zona. A través del análisis de laboratorios, se ha determinado que el suelo en estudio es predominantemente un suelo areno limoso (SM) de baja plasticidad, lo que tiene implicaciones directas en su compactibilidad y resistencia al agua. La geomorfología de la zona ha revelado una combinación de pendientes pronunciadas y alta erosión, desencadenando una variedad de amenazas por remoción en masa en diferentes zonas del área de estudio.

Al realizar el estudio de estabilidad de taludes, se modeló mediante SLIDE los perfiles de dos cortes que se tomaron como referencia en el terreno, tanto para taludes con sismo y sin él, los perfiles cumplen con el factor de seguridad según el título H de la NSR-10, sin embargo, en cada

corte se observa que el método Janbu Simplified es el que arroja el menor de los factores de seguridad de los demás métodos.

El análisis de amenazas ha demostrado que las pendientes abruptas y la meteorización de los macizos rocosos son factores determinantes en la amenaza de movimientos en masa. La evaluación ha permitido categorizar las áreas en función de su nivel de amenaza, destacando la prevalencia de amenaza alta en las zonas con pendientes pronunciadas y erosión significativa que corresponde al 36.79% de la zona analizada, pero también se evidenció que el 45.16% del territorio presenta una amenaza moderada.

La evaluación de la vulnerabilidad de las estructuras en el área de estudio ha arrojado una distribución variada, con una mayoría de estructuras clasificadas con vulnerabilidad moderada. Sin embargo, algunas estructuras presentan vulnerabilidades significativamente bajas, relacionadas con la calidad de la construcción y la ubicación cercana a taludes o zonas de baja pendiente, aunque una porción del sector de estudio arrojó vulnerabilidad alta, esto se debe a que en esa zona presenta movimientos en masa activos y por ende no hay presencia de construcciones en esa zona en específico.

La distribución de riesgo también está influenciada por factores topográficos y de probabilidad de eventos adversos. Las pronunciadas pendientes superiores al 75% son un factor determinante en la concentración de riesgo alto no mitigable. Esto se combina con la presencia de eventos adversos con potencial para causar daños significativos, donde la viabilidad de aplicar medidas de mitigación es limitada. Por otro lado, el riesgo moderado ocupa un porcentaje considerable (21.76%) de la región estudiada, debido en parte a su proximidad a las áreas de alto riesgo y a las vulnerabilidades estructurales identificadas en esas zonas. En contraste, el riesgo

bajo se asocia con terrenos de baja inclinación, que presentan una geomorfología favorable y un índice de vulnerabilidad mínimo.

En cuanto a las acciones de mitigación y prevención, se ha establecido que los perfiles de taludes cumplen con los factores de seguridad requeridos por la norma. Sin embargo, se ha notado la necesidad de implementar sistemas de protección para contrarrestar los pequeños desprendimientos de material y los bloques que podrían generar riesgos adicionales. En este sentido, se han propuesto medidas específicas para el control de remociones en masa, considerando la aplicación de diferentes tipos de estructuras de protección, como berma, trincheras, mallas de retención y sistemas anclados. Estas medidas, en conjunto con los análisis de factores de seguridad y el cumplimiento de normativas de diseño sísmico, permiten una base sólida para abordar el riesgo asociado a los movimientos en masa en el área de estudio.

Referencias

- [1] UNGRD. (2020). "Riesgo por movimientos en masa en Colombia". Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. Disponible en: <http://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Riesgo-por-movimientos-en-masa-en-Colombia.aspx>
- [2] Ley 1523 de 2012, Política nacional de gestión del riesgo de desastres y establece el sistema de gestión del riesgo de desastres y se dictan otras disposiciones. [Online]. Disponible: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>

- [3] Ministerio de Ambiente (2012). Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo. [Online] Disponible: <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/amenaza-vulnerabilidad-y-riesgo/>
- [4] Organización de los Estados Americanos. “Desastres, Planificación y Desarrollo: Manejo de Amenazas Naturales para Reducir los Daños”. [Online] Disponible en: <https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea57s/oea57s.pdf>
- [5] Caracol Radio. “IDEAM mantiene alerta roja y naranja por incendios forestales en Colombia”. [Online]. Disponible en: https://caracol.com.co/radio/2019/08/25/nacional/1566755886_134179.html
- [6] M. Galvis, F. Velandia, N. Villamizar (2014). Cartografía Morfoestructural de la Falla de Bucaramanga: Geometría Lenticular a lo Largo del Valle del Río Chicamocha en Santander. [Online] Disponible: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG17-056.pdf>
- [7] M. Múnera (2022). Desbordamiento del río Carare causa emergencias [Online] Disponible: <https://www.eltiempo.com/colombia/santander/graves-inundaciones-en-santander-cimitarra-719645>
- [8] La Patria (2023). Reportan caída de ceniza del volcán Nevado del Ruiz en Murillo y Villahermosa (Tolima). [Online] Disponible: <https://www.lapatria.com/caldas/reportan-caida-de-ceniza-del-volcan-nevado-del-ruiz-en-murillo-y-villahermosa-tolima>
- [9] Ministerio de interior y de justicia (2010). Guía Municipal para la Gestión del Riesgo. [Online] Disponible: <http://www.gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/archivos/GMGRColombia.pdf>

- [10] Caracterización General del Escenario de Riesgo por Movimientos en Masa en Bogotá. «Riesgo por Movimientos en Masa - IDIGER». Inicio - IDIGER». [Online] Disponible: [https://www.idiger.gov.co/rmovmasa#:~:text=Son%20conocidos%20popularmente%20como%20deslizamientos,fallas%20de%20taludes%20y%20laderas.&text=Son%20factores%20detonantes:%20las%20precipitaciones,sísmicos%20y%20los%20factores%20antrópicos,Bogotá D.C. 2023](https://www.idiger.gov.co/rmovmasa#:~:text=Son%20conocidos%20popularmente%20como%20deslizamientos,fallas%20de%20taludes%20y%20laderas.&text=Son%20factores%20detonantes:%20las%20precipitaciones,sísmicos%20y%20los%20factores%20antrópicos,Bogotá%20D.C.2023).
- [11] Hernández, S., Montoya león, J. P. (2017). Caracterización estática y dinámica del suelo (caso de estudio cabecera del municipio de los santos). Bucaramanga.
- [12] D. Román y G. Chio, “Análisis de modelos de deslizamiento en bloque para predecir el comportamiento dinámico del fenómeno de remoción en masa: Modelo Uniparamétrico y Modelo Biparamétrico”, Boletín de Geología, vol 40, pp 113-124, 2018
- [13] W. F. Montién (2017), “Análisis y evaluación del escenario de riesgo por movimientos en masa en la localidad de Rafael Uribe, Bogota D.C.”, [Online] Disponible en: <https://repositorio.ucm.edu.co/handle/10839/1914>
- [14] N. M Contreras (2008), “Análisis del fracturamiento presente en la formación Los Santos al noreste y centro de La Mesa de Los Santos, departamento de Santander”. [Online] Disponible en: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2008/140160.pdf>
- [15] Educalingo, “Zonificación”, [Online] Disponible: <https://educalingo.com/es/dic-es/zonificar#:~:text=Zonificaci%C3%B3n%20en%20sentido%20amplio%20indica,%20grado%20de%20riesgo%20etc.>
- [16] E. Sánchez y O. Cerritos (2007), “Concepto de mitigación”. [Online] Disponible en: <https://desastres.medicina.usac.edu.gt/documentos/docgt/pdf/spa/doc0143/doc0143-parte02.pdf>

- [17] J. Perdomo (s.f), “Gestión de Riesgos y Continuidad de Negocios ante Desastres Naturales y Emergencias”. [Online] Disponible en: <https://portalcip.org/wp-content/uploads/2018/08/SLOM-Jose-Perdomo.pdf>
- [18] Monografías plus (s.f), “Concepto de Amenaza Vulnerabilidad Riesgo y Desastre”, [Online] Disponible en: <https://www.monografias.com/docs/Concepto-De-Amenaza-Vulnerabilidad-Riesgo-y-Desastre-P3JN2TPJDUNZ#:~:text=La%20amenaza%20puede%20entenderse%20como,malo%20o%20peligroso%20puede%20suceder.>
- [19] Ejemplius (s.f), “Desastres Naturales No Son Realmente Naturales”, [Online] Disponible en: <https://ejemplius.com/muestras-de-ensayos/desastres-naturales-no-son-realmente-naturales/>
- [20] UNICEF (2003), “¡Aprendamos a prevenir los desastres!”, [Online] Disponible en: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/019254/PDF/aprendamosaprevenir.pdf>
- [21] C. D, Peña (S.F), “El arqueólogo Alfonso Caso y su informe con relación a los trabajos en Monte Albán”, [Online] Disponible en: <https://www.oaxaca.gob.mx/ageo/el-arqueologo-alfonso-caso-y-su-informe-con-relacion-a-los-trabajos-en-monte-alban/>
- [22] Gobierno de Guatemala (2012), “Protocolo de Recuperación post desastres”, [Online] Disponible en: <https://www.undp.org/es/guatemala/publications/protocolo-de-recuperaci%C3%B3n-post-desastre#:~:text=La%20recuperaci%C3%B3n%20post%20desastre%20es,la%20magnitud%20del%20desastre%20ocurrido.>

- [23] DeConceptos (S.F), “Concepto de suburbaización”, [Online] Disponible en:
<https://deconceptos.com/ciencias-sociales/suburbanizacion>
- [24] Servicio Geológico Colombiano (2017). “Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa”
- [25] Alcaldía Municipal de Piedecuesta, Santander (2020), “Plan Básico de Ordenamiento Territorial”, [Online] Disponible en:
<https://www.alcaldiadepiedecuesta.gov.co/Transparencia/Paginas/Plan-de-Ordenamiento-Territorial.aspx#InplviewHash1b961e5e-42b3-44c0-9a76-4e1812354123=WebPartID%3D%7B1B961E5E--42B3--44C0--9A76--4E1812354123%7D-FilterField1%3DA%255Fx00f1%255Fo-FilterValue1%3D2020>
- [26] INGEOMINAS. Geología de la plancha 120 Bucaramanga. (2013).
- [27] Caracol Radio (2018) “Por deslizamientos está cerrada otra vez la carretera Curos Málaga” [Online] Disponible en:
https://caracol.com.co/emisora/2018/05/28/bucaramanga/1527505852_639324.html
- [28] Caracol Radio (2020) “Es incierta la fecha para reabrir la vía Bogotá – Bucaramanga”, [Online] Disponible en:
https://caracol.com.co/radio/2020/02/27/nacional/1582825983_531595.html
- [29] Vanguardia (2020). “La avalancha en Piedecuesta arrasó con todo” [Online] Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/bucaramanga/la-avalancha-arraso-con-todo-FD2063766>
- [30] Bluradio (2022). “Fuertes lluvias provocaron emergencias en cinco municipios de Santander” [Online]. Disponible en:

<https://www.bluradio.com/blu360/santanderes/fuertes-lluvias-provocaron-emergencias-en-cinco-municipios-de-santander>

- [31] Caracol Bucaramanga (2022). “#Aestahora | Derrumbe en la vía Piedecuesta- Mesa de los Santos por las fuertes lluvias registradas en las últimas horas” [Online] Disponible en: <https://twitter.com/caracolbga/status/1572779900808880128>
- [32] Vanguardia (2020). “Por derrumbes hay cierres en la vía entre Piedecuesta y La Mesa de Los Santos” [Online] Disponible en: <https://www.vanguardia.com/area-metropolitana/piedecuesta/por-derrumbes-hay-cierres-en-la-via-entre-piedecuesta-y-la-mesa-de-los-santos-AH6548244>
- [33] NSR-10 (2010). “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente”, [Online] Disponible en: <https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>
- [34] Gobernación de Santander. (2012). Plan departamental de agua. Santander, Colombia. Recuperado de <http://www.santander.gov.co/planes-y-programas/plan-departamental-de-agua>
- [35] Corporación Autónoma Regional de Santander. (2016). Plan de manejo ambiental de la cuenca alta del río Frío. Santander, Colombia. Recuperado de <http://www.carsantander.gov.co/documentos/planes-de-manejo-ambiental/plan-de-manejo-ambiental-de-la-cuenca-alta-del-rio-frio.html>
- [36] "Suelo limoso: Qué es, características Y mucho más". Conozcamos los planetas, la luna, el sol, y todo el sistema solar. (2019). https://misistemasolar.com/suelo-limoso/#google_vignette

- [37] Weather Spark (2023). “Clima y el tiempo promedio en el año en Los Santos”. [Online] Disponible en: https://es.weatherspark.com/y/24383/Clima-promedio-en-Los-Santos-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o#google_vignette
- [38] W. Cabrera, “La Mesa de Los Santos”, Sociedad Geográfica de Colombia, vol. 16, no. 58, pp 1-32, 1958.
- [39] Google Earth (2023), “Peaje La Punta”, [Online] Disponible en: <https://earth.google.com/web/search/peaje+la+punta/@6.91737182,-73.03412193,1658.05338252a,245.68779135d,35y,-8.08890873h,24.86952044t,0r/data=CnkaTxJJCiUweDhlNjg0OGZiZGRlMTewOTk6MHgxYmE4YmU2NjY0ODJiMTAyGXmNXaJ6qxtAicMN-PwwQLAKg5wZWFqZSBsYSBwdW50YRgBIAEiJgokCcB5ipoS3xtAEeA3tetStxtAGTs2lqYDQFLAIQODDNxoRFLA>
- [40] F. Leone, “Concept de vulnerabilite applique a l’evaluation desrisques generes par les phénomènes de mouvements de terrain”, tesis doctoral, Universidad Joseph Fourier, Grenoble, 1996.
- [41] D. M. Cruden y D. J. Varnes, “Landslide Types and Proceses Special Report, Trasportatio Research Board, National Academy of Sciences”, Special Report 247 – National Research Council, pp 36-75, 1996.
- [42] Dronetootls México (2016). “Inspección de obra, estabilización de taludes”, [Online] Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=UU41p032ULU>
- [43] El Quindiano (2023), “Bioingeniería, un sistema para recuperar suelos en el Quindío”, [Online] Disponible en: <https://www.elquindiano.com/noticia/41210/bioingenieria-un-sistema-para-recuperar-suelos-en-el->

quindio#:~:text=Con%20m%C3%A1s%20de%20%24%20900%20millones,vivos%20combinados%20con%20otros%20recursos.

- [44] Warco S.A.S, “Sistemas Warco”, [Online] Disponible en: <https://warco.com.co/sistemas/>
- [45] Trumer Schutzbauten, “Estabilización de taludes”, [Online] Disponible en: <https://es.trumerschutzbauten.com/slope-stabilization/>
- [46] DEACERO, “La versatilidad de los muros de gavión en la construcción”, [Online] Disponible en: <https://blog.deacero.com/la-versatilidad-de-los-muros-de-gavion>
- [47] Core Control Solutions, “Penyclip – Tunnel Control System”, [Online] Disponible en: <https://corecontrols.co.uk/case-studies/penyclip-tunnel-control-system/>
- [48] IDEAM, "Metodología para la zonificación en susceptibilidad general del terreno a los movimientos en masa", Bogotá D.C, 2012.