



Universidad **Mariana**

Formulación de estrategias de estabilización de taludes mediante obras de contención con un análisis multitemporal y tecnología LiDAR en el corregimiento de Roma Chávez, Sandoná.

Eliana Maribel Alomía Obando
Juan Sebastián Castillo Meneses
Laura Valentina Escobar Huertas
Juan David Hidalgo Guevara

Universidad Mariana
Facultad de ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
San Juan de Pasto

2024

Formulación de estrategias de estabilización de taludes mediante obras de contención con un análisis multitemporal y tecnología LiDAR en el corregimiento de Roma Chávez, Sandoná

Eliana Maribel Alomía Obando
Juan Sebastián Castillo Meneses
Laura Valentina Escobar Huertas
Juan David Hidalgo Guevara

Informe de investigación para optar al título de Ingeniero Civil

Juan David Salazar Diaz
Ingeniero civil asesor

Universidad Mariana
Facultad de ingeniería
Programa de Ingeniería Civil
San Juan de Pasto
2024

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son
responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007

Universidad Mariana

Contenido

1. Resumen..... 13

1.1 Abstract..... 13

1.2 Formulación del problema 14

1.3 Justificación 14

1.4 Objetivos 16

1.4.1 Objetivo general..... 16

1.4.2 Objetivos específicos 16

1.5 Antecedentes 16

1.5.1 Antecedentes internacionales..... 16

1.5.2 Antecedentes nacionales 18

2 Presentación de resultados 21

2.2 Metodología 21

2.2.1 Metodología objetivo 1 21

2.2.2 Fotointerpretación 29

2.2.3 Descripción de los equipos 35

2.2.4 Procedimiento levantamiento topográfico 39

2.2.5 Procedimiento para procesamiento de datos LiDAR 41

2.3 Metodología objetivo 2 46

2.3.1 Generación de la nube de puntos 46

2.3.2 Civil 3D 47

2.3.3 Tabla de Varnes 49

2.4 Metodología objetivo 3 50

2.4.1 Civil 3D para diseños viales..... 50

2.4.2 Geo 5 60

2.4.3 Geo 5 para modelación de muros de contención..... 62

2.4.4 Geo 5 para modelación de anclajes de base 74

2.5 Resultados 83

2.5.1 Resultados objetivo 1 83

2.5.2 Resultados objetivo 2 86

2.5.3 Resultados objetivo 3 91

2.5.4 Características principales..... 98

3 Conclusiones 105

4 Recomendaciones 107

Índice de Tablas

Tabla 1. Siglas principales	12
Tabla 2. Parámetros de planeación de vuelo.....	39
Tabla 3. Materiales empleados	79
Tabla 4. Verificación	80
Tabla 5. Comparativa de secciones transversales	88

Índice de Figuras

Figura 1. Mapa geológico del municipio de Sandoná.....	22
Figura 2. Curvas de nivel representativas en el municipio de Sandoná.....	23
Figura 3. Movimientos en masa reportados en el SIMMA de la zona de estudio	24
Figura 4. Movimientos en masa, grietas de tensión y hundimientos en el corregimiento de Roma-Chávez.....	24
Figura 5. Unidades litoestratigráficas del área de estudio	25
Figura 6. Morfología de la zona de estudio, pendiente en grados	26
Figura 7. Zonas de amenaza sísmica.....	27
Figura 8. Mapa de inventario de movimiento en masa del municipio de Sandoná	28
Figura 9. Mapa de amenaza por movimiento en masa en el área de estudio	29
Figura 10. Zona de estudio en el año 2016	29
Figura 11. Zona de estudio en el año 2017	31
Figura 12. Zona de estudio en el año 2020	31
Figura 13. Zona de estudio en el año 2023	32
Figura 14. Estado de la carretera.....	33
Figura 15. Viviendas de la zona.....	34
Figura 16. Estado actual de la vegetación.....	34
Figura 17. Zenmuse L1 LiDAR y RGB.....	36
Figura 18. Dron matrice 300 RTK de DJI	37
Figura 19. Estación D-RTK2 de DJI + Leica GPS 1200	38
Figura 20. EPP	38
Figura 21. Esquema del procedimiento del levantamiento topográfico	39
Figura 22. Delimitación del área.....	40
Figura 23. Recorrido del dron.....	40
Figura 24. Vuelo	41
Figura 25. Ubicación de estación RTK y asignación de parámetros para reconstrucción de nube de puntos LiDAR	42
Figura 26. Resultado reconstrucción de nube de puntos LiDAR formato LAS	43
Figura 27. Creación de proyecto en spatix.....	44
Figura 28. Comparación de color vs trayectorias de vuelo.....	44

Figura 29. Recorte de overlape, suavizado y reducción de punto de ruido	45
Figura 30. Clasificación de puntos de terreno	45
Figura 31. Creación de modelo digital de elevaciones con Global Mapper	46
Figura 32. Generación de curvas de nivel.....	46
Figura 33. Nube de puntos - ortofoto.....	47
Figura 34. Mapa isométrico del área de estudio	48
Figura 35. Clasificación de la velocidad del deslizamiento y el daño potencial correspondiente.	49
Figura 36. Creación de superficie	51
Figura 37. Menú Civil 3D para creación de superficies de trabajo	51
Figura 38. Curvas de nivel para diseño geométrico de carretera.....	52
Figura 39. Creación de alineamiento	52
Figura 40. Asignación de velocidad y norma de diseño	53
Figura 41. Eje principal de la carretera.....	53
Figura 42. Creación del perfil	54
Figura 43. Creación visual del perfil.....	54
Figura 44. Perfil longitudinal.....	54
Figura 45. Creación de rasante.....	55
Figura 46. Rasante junto áreas de desmonte y terraplén.....	55
Figura 47. Bordes de la carretera	56
Figura 48. Vista en planta con alineamiento y bordes de la carretera	56
Figura 49. Sección típica.....	57
Figura 50. Creación del corredor	57
Figura 51. Vista en planta con corredores	58
Figura 52. Creación de línea de muestreo.....	58
Figura 53. Vista en planta de los perfiles a graficar	59
Figura 54. Creación de varias vistas de sección	59
Figura 55. Secciones transversales	60
Figura 56. Configuración básica.....	63
Figura 57. Geometría del muro.....	64
Figura 58. Material del muro	64

Figura 59. Localización de sondeos.....	65
Figura 60. Descripción de la muestra	66
Figura 61. Características del suelo	66
Figura 62. Peso del suelo	67
Figura 63. Características del suelo en Geo5.....	67
Figura 64. Coordenadas superiores del terreno.....	68
Figura 65. Nivel freático	68
Figura 66. Sobrecarga impuesta.....	69
Figura 67. Coordenadas inferiores del terreno.....	69
Figura 68. Casos de evaluación	70
Figura 69. Combos de verificación para condiciones permanentes.....	71
Figura 70. Combo de verificación para condiciones sísmicas.....	71
Figura 71. Análisis estructural y dimensionamiento del muro de contención.....	72
Figura 72. Verificación del talón del muro y cargas aplicadas.....	72
Figura 73. Análisis del salto del muro y fuerzas actuantes.....	73
Figura 74. Verificación del talón del muro y cargas aplicadas.....	73
Figura 75. Capacidad de carga.....	74
Figura 76. Creación de pilotes	75
Figura 77. Parámetros para pilotes.....	75
Figura 78. Configuración del módulo Kh.....	76
Figura 79. Parámetros del suelo para la modelación de pilotes.....	77
Figura 80. Cargas de servicio y designadas	78
Figura 81. Dimensiones del pilote	78
Figura 82. Material para pilotes ingresados en Geo5	79
Figura 83. Subsuelo del pilote	80
Figura 84. Capacidad portante	81
Figura 85. Verificación de la capacidad portante del pilote	81
Figura 86. Análisis del pilote.....	82
Figura 87. Verificación de cuantía de aceros para pilotes	82
Figura 88. Modelo digital de terreno con topografía LiDAR	84
Figura 89. Trazado de la vía	85

Figura 90. Curvas de nivel	85
Figura 91. Ortofoto	86
Figura 92. Modelo digital del terreno (MDT) año 2022	87
Figura 93. Curvas de nivel 0.5m - 1.0m	87
Figura 94. Comparativa del eje de la vía en los años correspondientes al análisis multitemporal	89
Figura 95. Comparativa del eje principal en los años correspondientes al análisis multitemporal	89
Figura 96. Secciones transversales del eje de la vía	90
Figura 97. Secciones transversales generales	90
Figura 98. Secciones transversales especiales	91
Figura 99. Estrategia de estabilización de taludes No. 1 - 2D	92
Figura 100. Estrategia de estabilización de taludes No. 1 - 3D	93
Figura 101. Estrategia de estabilización de taludes No. 2 – 2D	94
Figura 102. Estrategia de estabilización de taludes No. 2 – 3D	94
Figura 103. Pilote utilizado en la estrategia No.2 – 2D	95
Figura 104. Pilote utilizado en la estrategia No.2 – 3D	95
Figura 105. Estrategia de estabilización de taludes No. 3 – 2D	96
Figura 106. Estrategia de estabilización de taludes No. 3 – 3D	97
Figura 107. Pilote utilizado en la estrategia No.3 – 2D	97
Figura 108. Pilote utilizado en la estrategia No.3 – 3D	98

Índice de anexos

Anexo 113

Introducción

El corregimiento de Roma Chávez, Municipio de Sandoná, se encuentra en estado de vulnerabilidad debido a movimientos en masa de tipo deslizamiento, caída y volcamiento, que se han presentado a lo largo de los últimos años. La irregularidad del terreno y una serie de factores ambientales, como lluvias intensas y prolongadas o actividades humanas, como por ejemplo: el mal uso del suelo, han contribuido a la inestabilidad del terreno y a la aparición de riesgos asociados. Según Jurado Alonso (2018), "la detección de cambios en raster se realizó comparando los Modelos Digitales del Terreno y Superficie (MDT y MDS), lo que permite identificar áreas críticas".

Ante esta realidad, se hace imperativo desarrollar estrategias sólidas y efectivas que permitan mitigar estos riesgos y garantizar la seguridad de la comunidad local y de las infraestructuras en la zona. En este sentido, la formulación de estrategias de estabilización de taludes mediante obras de contención emerge como una necesidad primordial. La combinación de análisis multitemporal con tecnología LiDAR es fundamental para abordar este desafío. Según Alzate Giraldo (2018), "el análisis multitemporal por teledetección permite identificar patrones y tendencias en la evolución del terreno". Sin embargo, para abordar este desafío de manera integral y precisa, es esencial adoptar un enfoque que combine tanto el análisis detallado de la evolución del terreno a lo largo del tiempo como la aplicación de tecnologías avanzadas. La integración de un análisis multitemporal con tecnología LiDAR se presenta como una herramienta invaluable. Como se menciona en estudios previos, "la tecnología LiDAR proporciona datos tridimensionales de alta resolución que permiten una caracterización detallada de la topografía".

Teniendo en cuenta este contexto, realizar un análisis multitemporal con tecnología LiDAR no solo proporciona una comprensión más profunda de los desafíos relacionados con la estabilización de taludes en el corregimiento de Roma Chávez, sino que también establece las bases para el desarrollo de estrategias de intervención más efectivas y sostenibles. Esta introducción busca poner de relieve la importancia de adoptar un enfoque basado en datos y tecnológicamente avanzado para abordar los desafíos de estabilización de taludes en la región, proporcionando así las bases para el desarrollo de soluciones integrales y a largo plazo.

Siglas**Tabla 1.**
Siglas principales

SIGLA	SIGNIFICADO
LiDAR	Light Detection and Ranging
MDT	Modelo Digital del Terreno
MDS	Modelo Digital de Superficie
SNA	Servicio Nacional de Aerofotogrametría
FAB	Fuerza Aérea Boliviana
PMA: GCA	Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas
SIMMA	Sistema de Información de Movimientos en Masa
SGC	Servicio Geológico Colombiano
UNGRD	Unidad Nacional de Gestión del Riesgo
UGI	Unidades Geológicas para Ingeniería
EPP	Elementos de Protección Personal
IMU	Sensor de posición
TIN	Triangulated Irregular Network (Red Irregular de Triángulos)

1. Resumen

El corregimiento de Roma Chávez en Sandoná enfrenta una grave vulnerabilidad por movimientos en masa, como deslizamientos, caídas y volcamientos, lo que requiere la implementación de estrategias efectivas de estabilización de taludes mediante obras de contención. Para abordar este desafío, se propone un enfoque que combine el análisis multitemporal con tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging). Este enfoque permite entender la evolución del terreno y la influencia de diversos factores a lo largo del tiempo, mientras que la tecnología LiDAR proporciona datos tridimensionales detallados para identificar áreas de riesgo y puntos críticos. Esta combinación ofrece una comprensión profunda de los desafíos y establece las bases para estrategias de intervención efectivas y sostenibles. La investigación tiene como objetivo promover el uso de la tecnología LiDAR en la región, destacando su aplicación en levantamientos topográficos de alta precisión, lo cual es clave para la creación del modelo digital del terreno (MDT).

Palabras clave: LiDAR, Estabilización, Deslizamiento, Vulnerabilidad, Modelo Digital de Terreno (MDT)

1.1 Abstract

The township of Roma Chávez in Sandoná faces severe vulnerability due to mass movements, such as landslides, rockfalls, and toppling, necessitating the implementation of effective slope stabilization strategies through containment works. To address this challenge, a combined approach is proposed, integrating multitemporal analysis with LiDAR (Light Detection and Ranging) technology. This approach enables an understanding of terrain evolution and the influence of various factors over time, while LiDAR technology provides detailed three-dimensional data to identify risk areas and critical points. This combination offers a deep understanding of the challenges and lays the foundation for effective and sustainable intervention strategies. The research aims to promote the use of LiDAR technology in the region, highlighting its application in high-precision topographic surveys, which is key to creating the digital terrain model (DTM). Moreover, since the municipality

of Sandoná is highly vulnerable to landslides, the outcome of this technology will be used to analyze the stability of a slope in the Roma Chávez township within this municipality.

Keywords: LiDAR, Stabilization, Landslide, Vulnerability, Digital Terrain Model (DTM)

1.2 Formulación del problema

¿Es posible formular estrategias de estabilización de taludes mediante obras de contención con un análisis multitemporal y tecnología LiDAR en el corregimiento de Roma Chávez?

1.3 Justificación

En la vía entre el municipio de Sandoná y Ancuya, existe una clara preocupación por la seguridad de la comunidad local, puesto que, los movimientos en masa se presentan de manera continua sobre todo en temporada de altas precipitaciones. Este fenómeno se ha visto impulsado en esta región del municipio por las malas prácticas de explotación agropecuaria, inadecuada utilización del agua y las características de la estructura geológica, generando afectación en viviendas, cultivos, vías, infraestructura de servicios públicos, entre otros.

En primer lugar, es importante destacar que el movimiento de masa representa una amenaza potencial para la seguridad de las comunidades que residen en áreas cercanas. Los deslizamientos de tierra y colapsos de taludes pueden ocasionar daños materiales, lesiones e incluso pérdidas humanas. El corregimiento de Roma Chávez, al igual que muchas otras áreas geográficas, enfrenta este riesgo debido a su topografía y características del terreno. Por lo tanto, la implementación de estrategias de estabilización es crucial para mitigar esta amenaza y garantizar la seguridad de la población local.

Además de la seguridad humana, la estabilización de taludes también contribuye a la preservación del medio ambiente y la biodiversidad. Los deslizamientos de tierra pueden tener efectos devastadores en los ecosistemas circundantes, causando la pérdida de hábitats naturales, la contaminación de cuerpos de agua y la degradación del suelo. Al implementar obras de contención

adecuadas, se pueden minimizar estos impactos negativos y promover la conservación de los recursos naturales en el corregimiento de Roma Chávez.

La utilización de tecnología LiDAR en el análisis multitemporal de los taludes es fundamental para una gestión eficaz de los riesgos asociados con estos fenómenos. La capacidad de obtener datos precisos y detallados sobre la topografía del terreno y los cambios que ocurren a lo largo del tiempo permite una evaluación más completa, además, la tecnología LiDAR ofrece la ventaja de ser no invasiva y de alto rendimiento, lo que permite la recopilación rápida y eficiente de datos en áreas extensas y de difícil acceso. Esto es especialmente importante en el caso del corregimiento de Roma Chávez, donde la topografía montañosa y la densa vegetación pueden dificultar el acceso a los sitios de interés y la realización de inspecciones tradicionales.

Otro aspecto relevante a considerar es el impacto socioeconómico de los deslizamientos de tierra en el corregimiento de Roma Chávez, ya que estos eventos pueden interrumpir las actividades económicas locales, como la agricultura, considerando que se ha potencializado la siembra de caña de azúcar y es su principal fuente económica además del turismo, ya que Sandoná cuenta con un clima cálido, además, con su ubicación estratégica cerca de otros municipios, se ha convertido en un destino popular gracias a su rica oferta de platos tradicionales y una de las piezas arquitectónicas más impresionantes de Colombia. Sin embargo, este crecimiento turístico ha impactado negativamente tanto los medios de vida de la población local como la economía regional en su conjunto.

Por otro lado, la investigación aborda un vacío de conocimiento en el ámbito de la estabilización de taludes, aunque existen estudios sobre técnicas de estabilización de taludes, pocos han integrado de manera sistemática la tecnología LiDAR y el análisis multitemporal para comprender mejor la dinámica y la evolución de los taludes a lo largo del tiempo. Los resultados obtenidos de esta investigación tienen el potencial de ser generalizados a principios más amplios en el campo de la ingeniería geotécnica y la gestión de riesgos naturales, ya que los hallazgos podrían ser aplicables a otras regiones geográficas con características similares, permitiendo la transferencia de conocimientos y la adaptación de las estrategias de estabilización a diferentes contextos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Formular estrategias de estabilización de taludes mediante obras de contención con un análisis multitemporal y tecnología LiDAR en el corregimiento de Roma Chávez.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar el levantamiento topográfico mediante tecnología LiDAR
- Comparar los modelos digitales del terreno (MDT) obtenidos del sensor LiDAR con resultados previos mediante un análisis multitemporal haciendo uso de Civil 3D.
- Proponer estrategias de estabilización de taludes mediante obras de contención con el uso de Geo 5 que garanticen una mayor seguridad para la población e infraestructura local.

1.5 Antecedentes

1.5.1 Antecedentes internacionales

La estabilización de taludes es un tema importante a nivel mundial por su impacto en la seguridad. Varios países han enfrentado problemas similares y han implementado diferentes estrategias para mitigar los riesgos. A continuación, se presentan antecedentes internacionales relevantes en este campo.

Inicialmente se cuenta con un estudio realizado en Brasil en el año 2009, titulado “Método para aplicação de escâner a laser terrestre ao estudo da estabilidade de taludes em rocha” (Método de aplicación de un escáner láser terrestre para estudiar la estabilidad de pendientes rocosas), el cual se enfoca en la aplicación del escáner láser terrestre para analizar la estabilidad de taludes en roca en la mina Saivá, en Paraná, utilizada para la producción de cemento. Se realizaron levantamientos de campo rápidos, identificación y medición de estructuras geológicas en la imagen digital tridimensional, elaboración de diagramas estructurales y análisis de la estabilidad de los taludes. Los resultados muestran que la herramienta es precisa en la medición de actitudes de planos de ruptura, con medidas digitalmente compatibles con las observadas en campo. Además, resalta la

capacidad de trabajar con gran cantidad de datos y obtener parámetros estructurales de áreas de difícil acceso en campo.

Existe un segundo estudio titulado "Diseño estructural de un muro de contención bajo parámetros geotécnicos en estado saturado modelado en software Geo5" se llevó a cabo en la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador durante el año 2023. El objetivo principal de esta investigación fue diseñar un muro de contención que cumpla con los parámetros geotécnicos necesarios para resistir cargas en estado saturado, utilizando el software Geo5 para el modelado y análisis. Para lograr este objetivo, se realizaron análisis geotécnicos detallados, considerando factores como el tipo de suelo, la inclinación del terreno y las cargas esperadas. Los resultados obtenidos demostraron la eficacia del software Geo5 en el diseño de estructuras de contención bajo condiciones específicas de saturación, proporcionando un enfoque sólido y confiable para futuros proyectos de ingeniería civil en áreas similares.

También, se examinó el proyecto "Evaluación de sistemas avanzados de contención con cimentaciones profundas para la estabilización del talud en el lecho del Río Rímac-Lima", realizado en el año 2020, se desarrolló en vía expresa línea amarilla, calzada derecha, ubicada en la pk 5+920 hasta la pk 6+000 de la ribera del río Rímac. El objetivo principal fue evaluar las condiciones del talud expuesto a socavación en el pie del lecho del río Rímac, así como realizar estudios geotécnicos para reforzar el talud con sistemas avanzados que cumplan los estándares de factor de seguridad nacionales e internacionales. El estudio incluyó la realización de estudios de mecánica de suelos, corte directo a gran escala y la obtención de nuevos sistemas avanzados para la contención y reforzamiento del talud. Se llevaron a cabo pilotes con una profundidad de 19 metros y anclajes activos inclinados de 26 metros para disminuir los efectos de posibles eventos naturales o externos. Los resultados obtenidos a través del programa Slide mostraron factores de seguridad suficientes para la estabilidad del talud. Se descubrió que la erosión estaba debilitando la ladera, así que se decidió reforzarla. Los análisis del suelo mostraron que tenía características favorables. Se instaló un sistema de refuerzo con pilotes y anclajes que aseguró la estabilidad de la ladera. Las pruebas de resistencia de los pilotes comprobaron su buen funcionamiento.

Un cuarto proyecto llamado "Levantamiento Topográfico con Metodología LIDAR para la Generación del Modelo Digital del Terreno y Superficie de la Comunidad de Umapalca del Departamento de La Paz", se realizó en el año 2019 en Bolivia, y, consistió en obtener una nube de puntos utilizando un Sensor Aerotransportado basado en tecnología LIDAR para generar el Modelo Digital de Terreno y Modelo Digital de Superficie (MDT y MDS), solicitado por la empresa ENDE TRANSMISIÓN S.A. El estudio se llevó a cabo en el Servicio Nacional de Aerofotogrametría (SNA) de la Fuerza Aérea Boliviana (FAB), donde se realizaron actividades de trabajo de campo y procesamiento de datos LIDAR. Se demostró que el levantamiento topográfico con metodología LIDAR permite terminar el trabajo en corto tiempo y abarcar grandes extensiones, aunque tiene la limitante de un alto costo. Los resultados mostraron una precisión altimétrica dentro del rango de tolerancia previsto por la empresa contratante y destacaron las diversas aplicaciones de los datos LIDAR, desde generar planos topográficos hasta la cuantificación de bosques.

Finalmente se hizo una revisión del proyecto "Estabilización de Talud por Tres Métodos: Gaviones, Geomalla y Muro de Contención en el Centro Poblado San Juanito Alto, Distrito de Guadalupe-Viru-La Libertad" realizado en la Universidad San Pedro de Perú en el año 2018, aborda el problema de los deslizamientos de rocas y gravas en el Centro Poblado de San Juanito Alto, que representan un peligro para las viviendas cercanas. Se realizaron estudios de suelo y cálculos de diseño para cada método, y se encontró que el método de geomalla ofrecía la mejor estabilidad, aunque con un costo más elevado. Se concluyó que, dada la topografía accidentada de la zona, la estabilización con este método era la opción más segura y que mejoraría la calidad de vida de los habitantes de San Juanito Alto.

1.5.2 Antecedentes nacionales

En Colombia, se han realizado investigaciones y proyectos para abordar problemas como la estabilidad de taludes, movimientos en masa y la construcción de muros de contención. A continuación, se presentan algunos antecedentes nacionales relevantes sobre estos temas.

Se tiene un artículo monográfico denominado "Uso de tecnología LiDAR en la evaluación de proyectos viales" del año 2010 estudia la importancia de contar con mapas detallados y precisos

para proyectos de ingeniería e investigación. Presenta el LiDAR como una tecnología que emplea pulsos láser para calcular distancias con precisión y generar mapas en 3D, ofreciendo una visión detallada del terreno. Se destacan las ventajas, como su alta productividad y precisión en comparación con la topografía convencional. Por ejemplo, el LiDAR puede realizar levantamientos y generar ortofotos en un tiempo mucho menor que la topografía tradicional. Sin embargo, se señala que el costo de esta tecnología puede ser elevado, especialmente en áreas pequeñas. También se menciona que la tecnología permite obtener datos en áreas de difícil acceso, como zonas selváticas, donde otros métodos podrían tener limitaciones.

Asimismo, se revisó el estudio titulado "Uso de drones y sensores remotos para el monitoreo de laderas: una revisión", realizado en la Universidad Militar Nueva Granada en Cajicá, Colombia, en el año 2021, aborda la problemática de los deslizamientos de tierra, destacando su impacto en la infraestructura vial y la economía de países en vías de desarrollo. Frente a los costosos y a veces peligrosos métodos tradicionales de monitoreo in situ, se propone el uso de drones y sensores remotos como una alternativa más eficiente y segura. Los resultados obtenidos muestran mejoras significativas en la precisión y eficacia del monitoreo de laderas, lo que sugiere un cambio positivo en la forma en que se tratan estos problemas. También, se plantea la integración de la tecnología de drones y sensores remotos en la formación académica de ingeniería civil, lo que implicaría la adquisición de equipos y la capacitación correspondiente para su uso adecuado.

De igual modo, se dispone de otro proyecto llamado "Estudio de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa, Escala 1:5000 en Vía Departamental 17NR06-3. Ancuya-Sandoná (Corregimiento Roma Chávez), Nariño" realizado en Sandoná, Nariño, tuvo como objetivo identificar y evaluar los riesgos por movimientos en masa, especialmente deslizamientos, en la zona. El estudio se basó en análisis de datos topográficos, geológicos y sociales, evidenciando que las malas prácticas agrícolas y la geología local contribuyen significativamente a estos eventos, los cuales han afectado viviendas, cultivos y vías de acceso. La colaboración entre la Gobernación de Nariño y la Alcaldía de Sandoná fue fundamental para llevar a cabo este estudio, con el fin de mejorar la capacidad de respuesta ante desastres, en cumplimiento de la Ley 1523 del 2012. Los resultados revelaron un alto riesgo de deslizamientos en la zona, con aproximadamente el 85% de la misma clasificada en una categoría de amenaza considerable. Estos hallazgos resaltan

la urgencia de implementar medidas preventivas y de mitigación para reducir este riesgo y proteger a la población y sus recursos.

Se cuenta con un estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa en la región andina, abordado en la guía "Movimientos en Masa de la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas", Su principal objetivo es mejorar la calidad de vida de los habitantes de la región andina y reducir el riesgo de desastres en los países de esta zona. Este proyecto surge en el marco del Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA:GCA), con el propósito de ofrecer una visión específica para la región andina en el análisis de amenazas por movimientos en masa. El trabajo de elaboración de esta guía involucró la colaboración de profesionales de diferentes servicios geológicos del PMA:GCA, quienes aportaron desde distintas disciplinas y experiencias de trabajo en la región andina. La guía consta de cinco capítulos y dos anexos, abarcando desde la descripción de los tipos de movimientos en masa hasta la propuesta de un inventario andino de movimientos en masa.

Por último, se tiene el proyecto de grado titulado "Monitoreo de Movimientos en Masa Utilizando Tecnología LiDAR: Caso de Estudio en las Afueras de Medellín, Antioquia", realizado entre los meses de diciembre de 2015 y Junio de 2016, se estudia la importancia del monitoreo de movimientos en masa en proyectos ingenieriles, especialmente en zonas donde se ha modificado la topografía inicial. Se focaliza en una zona específica cercana a Medellín, Antioquia, afectada por un continuo movimiento en masa tipo reptacional, que se empeora con las lluvias. El objetivo principal es utilizar la tecnología LiDAR para monitorear de manera rápida y precisa las condiciones del talud, incluyendo forma, velocidad de desplazamiento y partes en falla, relacionando estos datos con factores geotécnicos, geológicos y topográficos. Los resultados obtenidos permitirán evaluar la situación actual del talud y sugerir posibles aplicaciones en el área de la geotecnia, con el fin de controlar movimientos mayores y mitigar costos en tareas de remediación.

2 Presentación de resultados

2.2 Metodología

A continuación, se explica la información recopilada, los equipos, métodos, procedimientos empleados para el desarrollo proyecto planteado.

2.2.1 Metodología objetivo 1

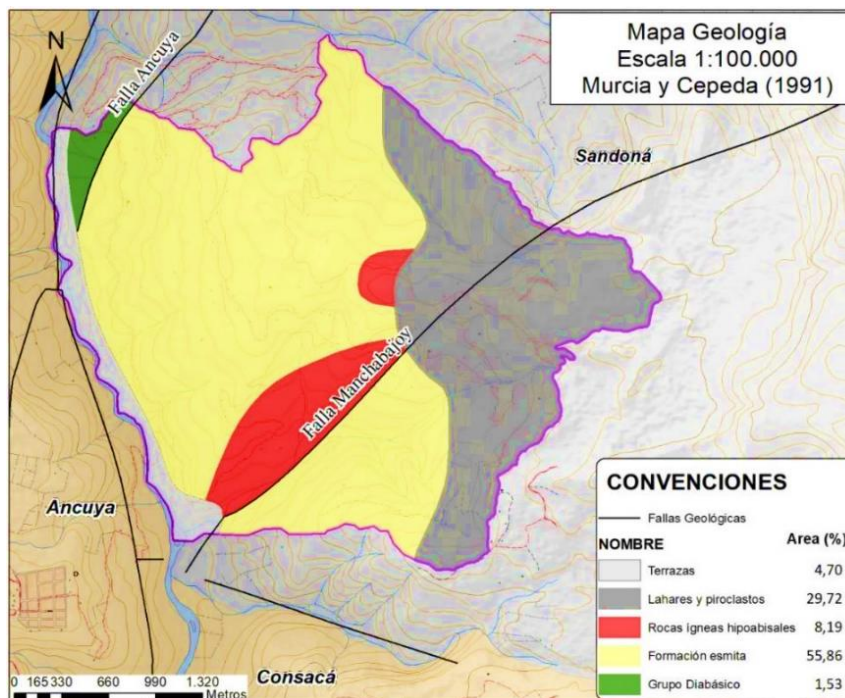
El primer objetivo corresponde a: “Realizar el levantamiento topográfico mediante tecnología LiDAR”, y para su cumplimiento se tuvo en cuenta la siguiente estrategia de trabajo.

2.2.1.1 Recopilación de información

El municipio de Sandoná, se encuentra en una región con un contexto geológico diverso y complejo. Esta zona está influenciada por la interacción de varias placas tectónicas y la presencia de la cordillera de los Andes, lo que da lugar a una geología variada y dinámica.

En primer lugar, la cordillera de los Andes atraviesa el departamento de Nariño, proporcionando una topografía montañosa y accidentada en la que se encuentra Sandoná, lo que da lugar a que la geología regional del sur occidente colombiano está regida por el levantamiento de los Andes producto de la interacción de la placa Nazca en la placa suramericana y se relaciona estratigráficamente con el terreno Calima. (Ver figura 1)

Figura 1.
 Mapa geológico del municipio de Sandoná



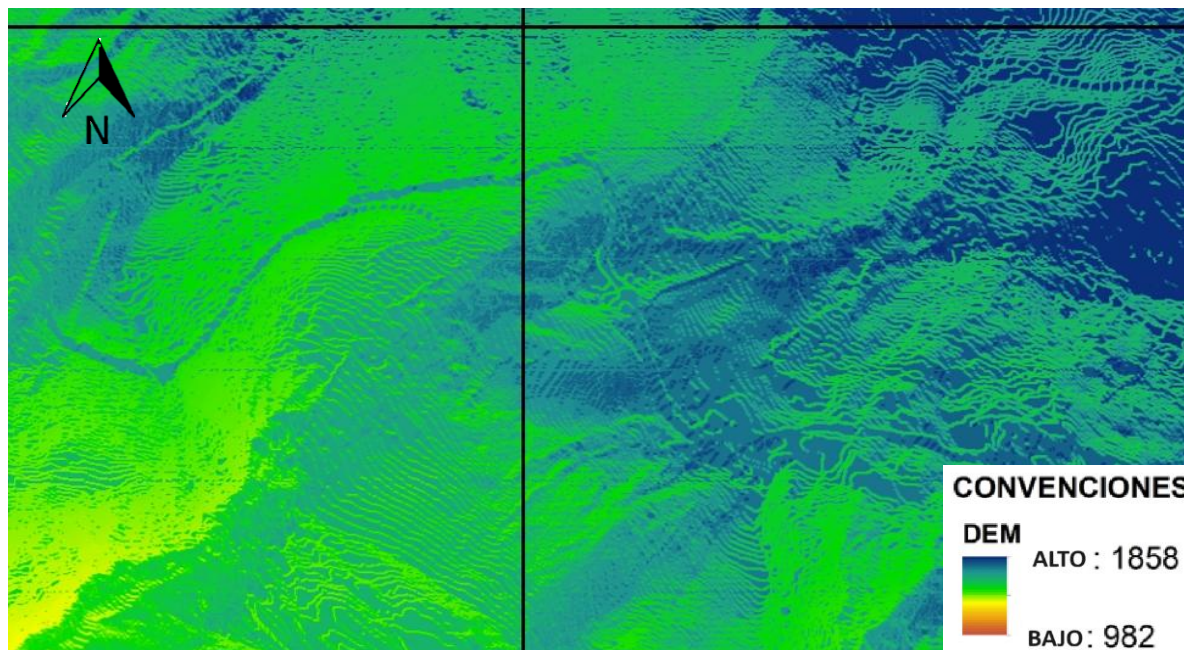
Fuente: Murcia y Cepeda, 1991.

Para la recopilación de los datos, se consultaron los informes y registros de diversas entidades de orden nacional, departamental y local, como lo son, el Sistema de Información de Movimientos en Masa (SIMMA - SGC), Alcaldía de Sandoná, la Corporación Autónoma Regional de Nariño (CORPONARIÑO), la Unidad Nacional de Gestión del Riesgo (UNGRD) y otros reportes disponibles en medios de accesos públicos.

2.2.1.2 Curvas de nivel representativas

Como se observa en la figura 2, las curvas de nivel representativas son importantes en los estudios de amenaza por movimientos en masa ya que permiten una representación precisa y detallada de la topografía del terreno. Esta información es esencial para identificar las áreas vulnerables, así como para determinar las características de los cauces y las pendientes que pueden favorecer la ocurrencia de este fenómeno.

Figura 2.
Curvas de nivel representativas en el municipio de Sandoná

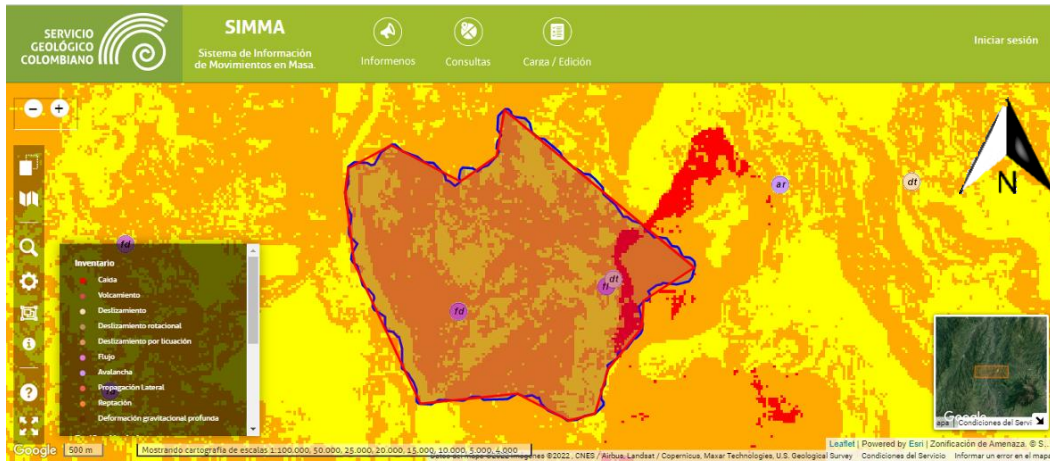


Fuente: Alcaldía de Sandoná, 2022.

2.2.1.3 Registros plataforma SIMMA – SGC

Los resultados de la plataforma SIMMA en la zona de estudio, corresponden a registros del catálogo de movimientos en masa. La mayoría de los procesos corresponden a deslizamientos traslacionales, flujos de detritos y flujos de lodos localizados en la vereda Chávez. (ver figura 3)

Figura 3.
Movimientos en masa reportados en el SIMMA de la zona de estudio

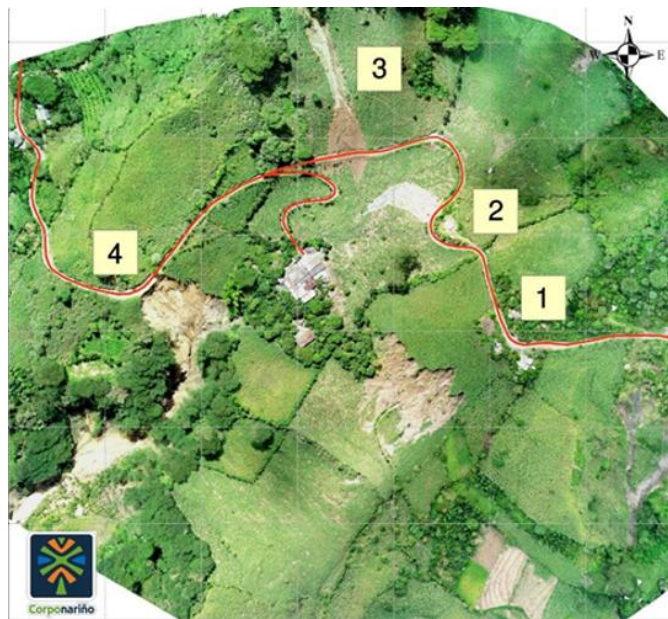


Fuente: SGC, 2022.

2.2.1.4 Corporación Autónoma Regional del Nariño (CORPONARINO)

Se revisó el concepto técnico reportado el 21 de junio 2021 por la Corporación Autónoma Regional de Nariño, donde se registraron movimientos en masa, grietas de tensión y hundimientos del terreno, en la vereda la Cocha y el corregimiento Roma - Chávez. (ver figura 4)

Figura 4.
Movimientos en masa, grietas de tensión y hundimientos en el corregimiento de Roma-Chávez



Fuente: Corponariño, 2021.

2.2.1.5 Unidades geológicas para la ingeniería (UGI)

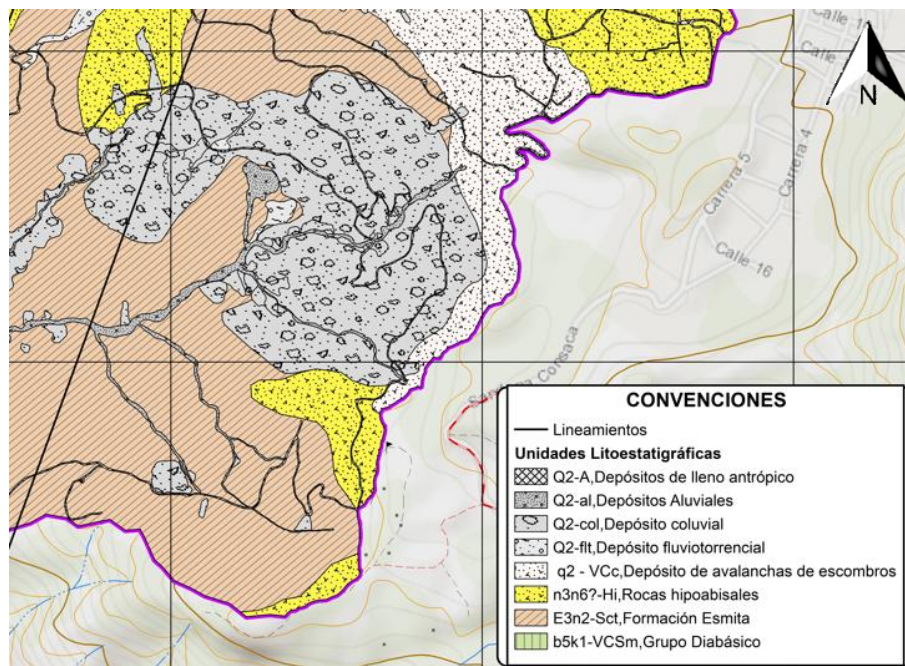
En este apartado se describen las Unidades Geológicas para Ingeniería (UGI) identificadas en el área de estudio que comprende al corregimiento de Roma-Chávez del Municipio de Sandoná.

Para la caracterización de las Unidades Geológicas para Ingeniería se utilizó los criterios descritos en la Guía de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por Movimientos en Masa, a escala detallada del SGC, 2016. Las UGI corresponden a las áreas delimitadas por el grado de homogeneidad de sus propiedades geomecánicas.

Las UGI se clasifican en rocas o suelo en los siguientes grupos (SGC,2016). (ver figura 5)

- Rocas
- Suelos residuales y saprolitos
- Suelos transportados
- Suelos antrópicos

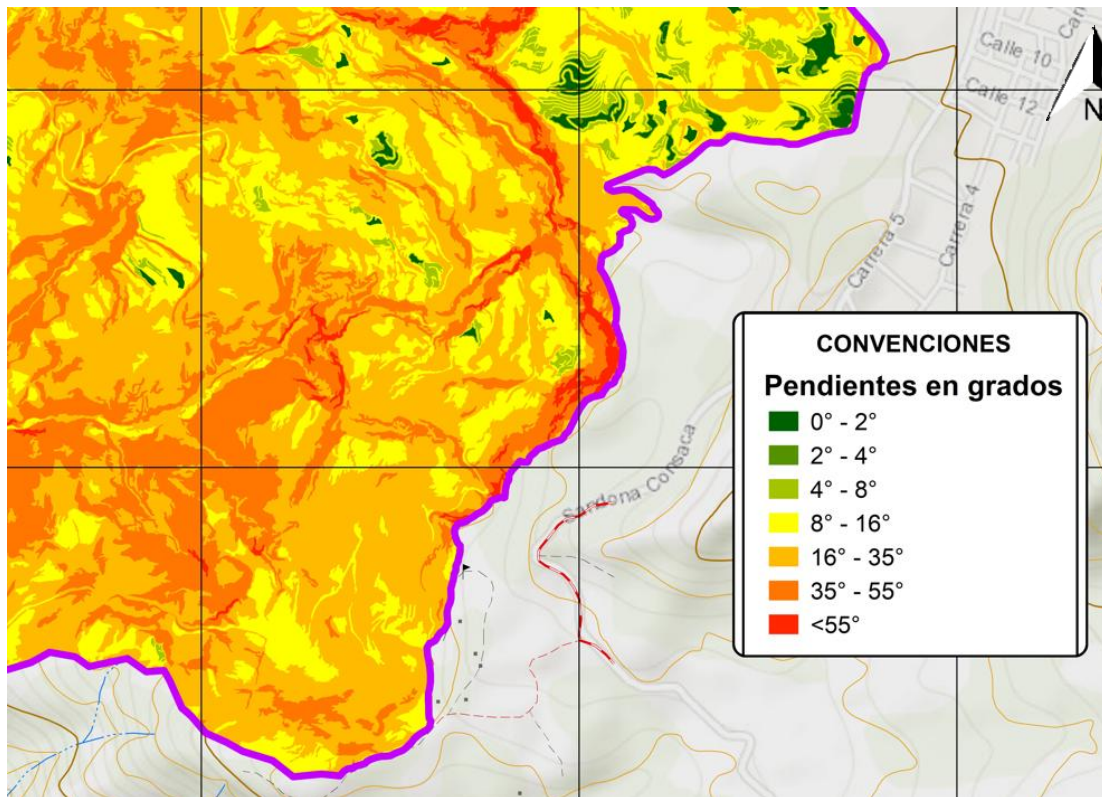
Figura 5.
Unidades litoestratigráficas del área de estudio



2.2.1.6 Morfología

Como se muestra en la figura 6, dentro del área que comprende el municipio de Sandoná y en particular, el área de estudio se observa que las morfologías más representativas corresponden a relieves alomados, colinados y montañosos. De características largas y con índices relativos de relieves moderados, convexas, y de cimas redondeadas, pendientes abruptas a muy abruptas. Aquellas morfologías con cimas agudas o depresiones topográficas cóncavas y laderas suaves con pendientes altas corresponden a relieves estructurales. Dentro de las áreas con pendientes más planas corresponden a planicies de materiales volcániclasticas y coluviales que rellenan valles y suavizan el terreno.

Figura 6.
Morfología de la zona de estudio, pendiente en grados

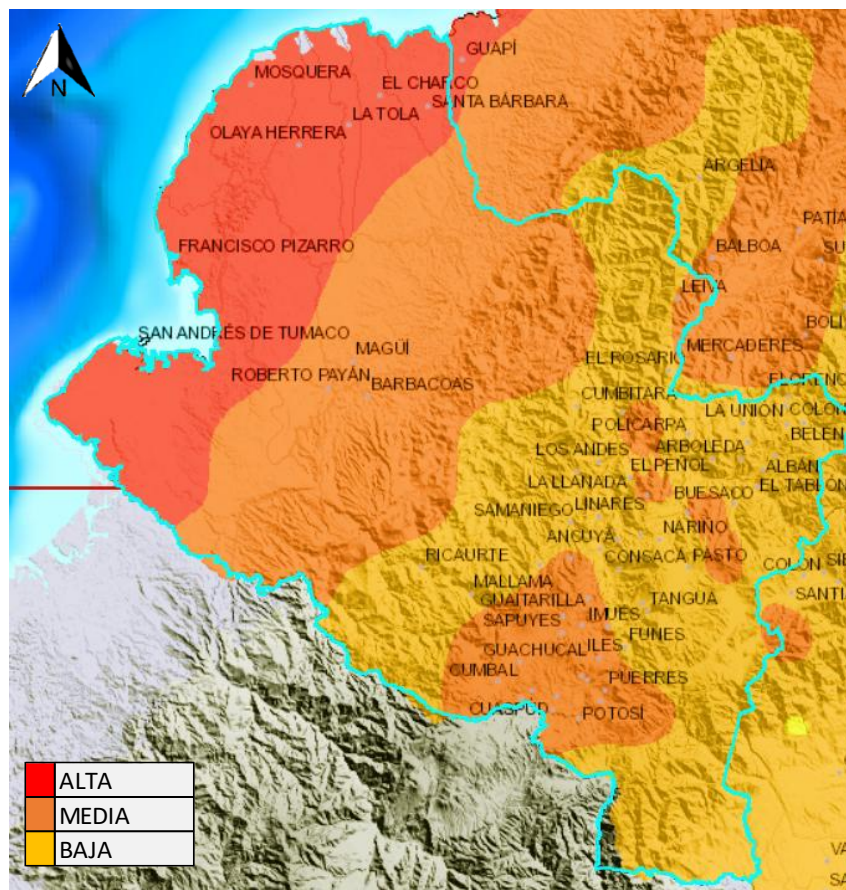


2.2.1.7 Sismicidad

Colombia está situada en el noroeste de Sudamérica, en una zona con alta complejidad geológica, ya que su territorio es producto de la interacción de tres placas tectónicas principales: la placa sudamericana, la placa de Nazca y la placa del Caribe. La región en cuestión posee una topografía dominada por cordilleras montañosas recientemente formadas. Estas características geológicas relativamente nuevas propician un ambiente proclive a la actividad sísmica y a las erupciones volcánicas.

Según lo establecido en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, el Departamento de Nariño se encuentra ubicado en una zona de amenaza sísmica alta., pero la zona en cuestión posee una zona de amenaza media. (ver figura 7)

Figura 7.
Zonas de amenaza sísmica



Fuente: SGC, 2015.

2.2.1.8 Amenaza por movimiento en masa

En el corregimiento de Roma – Chavez ubicados en el municipio de Sandoná, enfrentan una amenaza por movimientos en masa y estos pueden referirse a deslizamientos de tierra, derrumbes, fluidos de lodo u otros procesos geológicos que implican el despliegue de material rocoso y suelo por laderas o pendientes. (ver figura 9)

Figura 8.

Mapa de inventario de movimiento en masa del municipio de Sandoná

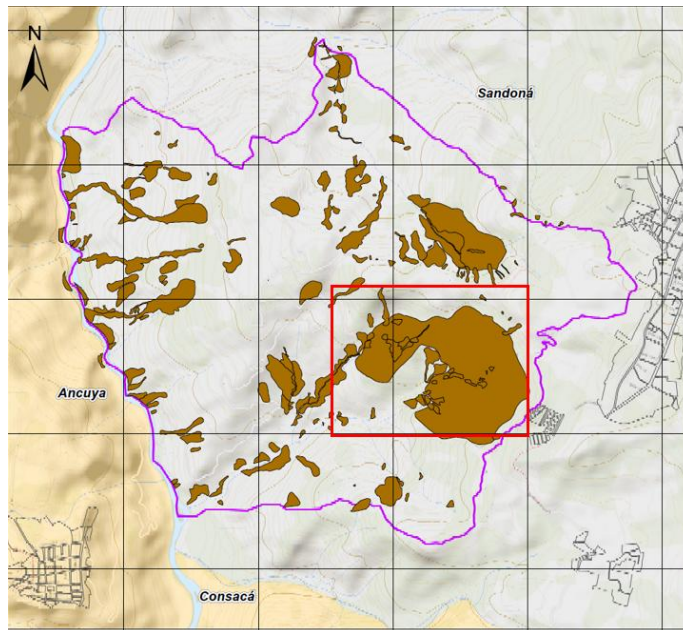
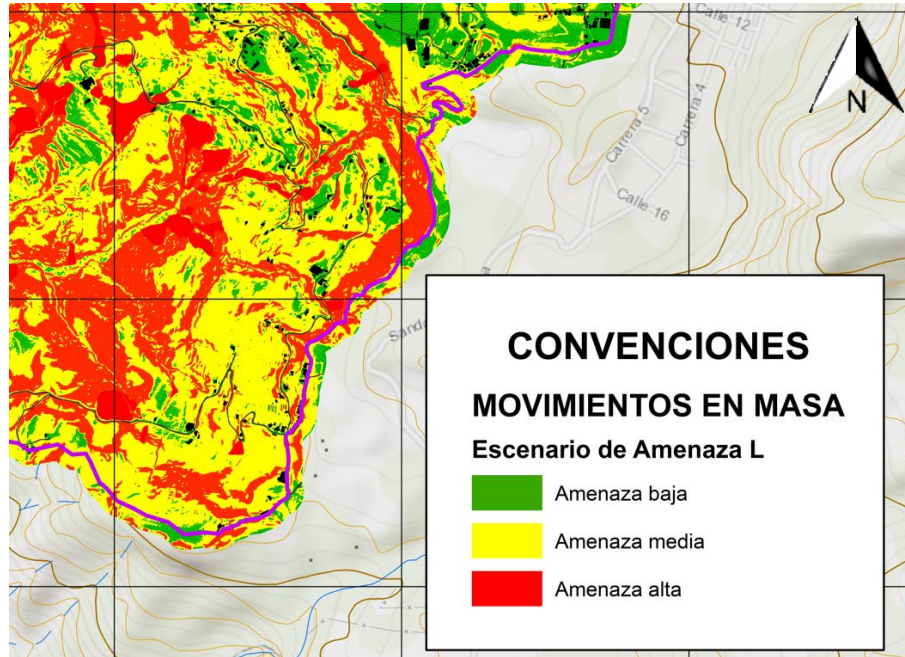


Figura 9.

Mapa de amenaza por movimiento en masa en el área de estudio



2.2.2 Fotointerpretación

Para la caracterización de los movimientos en masa, se realizó fotointerpretación mediante el análisis de diferentes imágenes satelitales (Google Earth) y los reportes obtenidos en el análisis de la información recopilada, además de visitas a la zona de estudio.

Los registros de la zona en estudio, se encuentran en anteriores investigaciones y se obtuvo las evidencias desde el aplicativo de Google Earth; para así, poder identificar las zonas de estudio en varias épocas; esto se hace con el fin de identificar las zonas de movimiento en masa.

Como primera instancia, se tiene el registro del año 2016, puesto que, el aplicativo de Google Earth no permite observar un registro completo de décadas pasadas.

Figura 10.

Zona de estudio en el año 2016



Fuente: Google Earth, 2024.

Donde se pudo observar una zona de mucha vegetación y a su vez muy segura para el tránsito, la habitabilidad del sector y la siembra que es el máximo centro de ingresos de varias familias. (ver figura 10)

Figura 11.

Zona de estudio en el año 2017

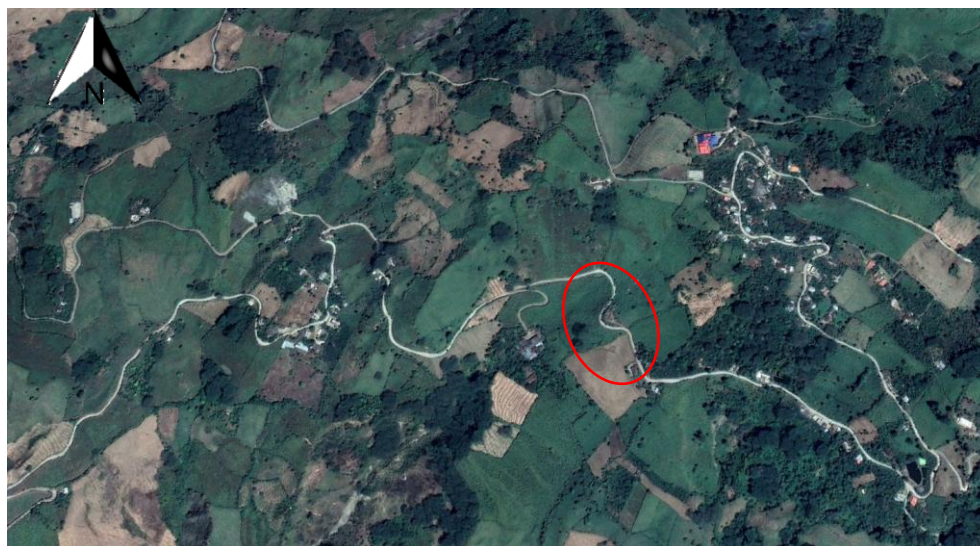


Fuente: Google Earth, 2024.

En la figura 11 se evidencia que la falla geológica está haciendo presencia tanto en la parte de la carretera y en los predios cercanos a ella.

Figura 12.

Zona de estudio en el año 2020



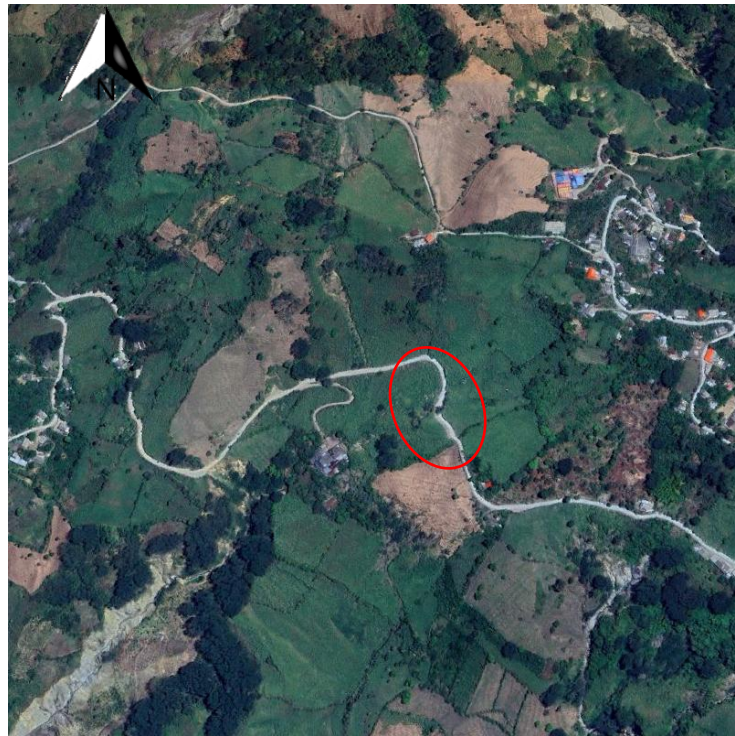
Fuente: Google Earth, 2024.

Durante los 3 años siguientes no se observó movimiento en masa y la zona vuelve a un estado favorable para la comunidad residente en la zona.

En la actualidad, se observaron y analizaron fracturas de tierras, movimiento en masa en la zona de la curva presentada en la figura 12 y principalmente en la grieta que se presenta en la vereda Roma.

Figura 13.

Zona de estudio en el año 2023

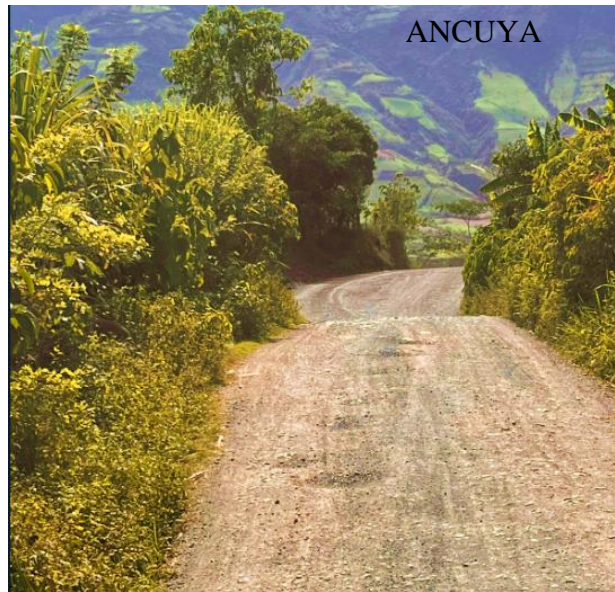


Fuente: Google Earth, 2024.

Se debe tener en cuenta que, durante el transcurso de estos años, el movimiento en masa se hace de forma interna y tiene repercusión en las zonas externas, y se pudo analizar que, en algunas zonas sobre la carretera tenemos curvas de nivel más elevadas, viviendas totalmente destruidas y la vegetación cuenta con grados de inclinación o simplemente en algunos sectores ya es inexistente.

En la figura 14 se muestra un camino rural sinuoso que atraviesa una zona montañosa cubierta de vegetación densa. La forma serpenteante del camino y el paisaje accidentado surgieron a través del riesgo de movimiento en masa presente en la zona, esta vía corresponde a una vía secundaria que va desde el municipio de Sandoná hasta Ancuya.

Figura 14.
Estado de la carretera



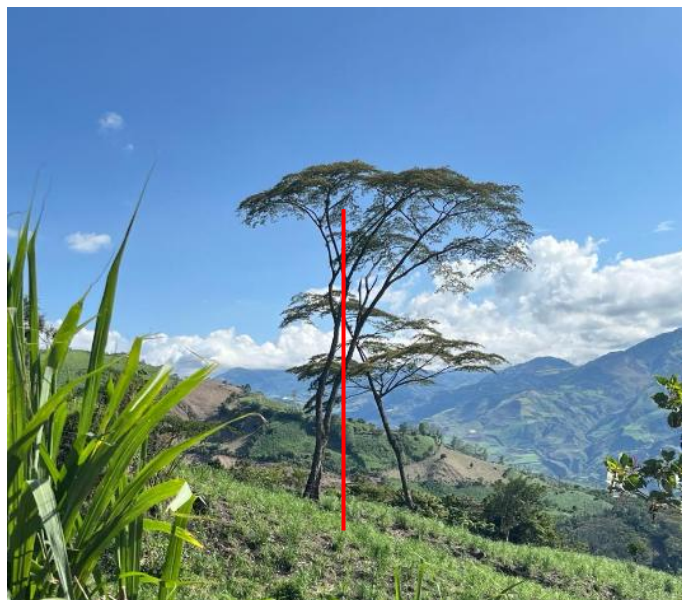
En la figura 15 se presenta una estructura de concreto semiderruida, posiblemente una antigua casa o refugio, ubicada en un entorno selvático. La estructura dañada y los escombros esparcidos son el resultado de un movimiento de masa previo, dado a un deslizamiento de tierra o una avalancha que impactó en esa ubicación.

Figura 15.
Viviendas de la zona



En la figura 16 se observa cómo es la afectación que tiene la naturaleza en esta situación, también se observan signos evidentes de movimientos de masa; el terreno escarpado y las pendientes pronunciadas en las montañas son factores que pueden contribuir a la inestabilidad del suelo y al riesgo de deslizamientos o derrumbes en la zona.

Figura 16.
Estado actual de la vegetación



2.2.3 Descripción de los equipos

Para dar cumplimiento con el primer objetivo que hace referencia a realizar el levantamiento topográfico se hizo uso de los siguientes equipos y materiales.

LIDAR (Light Detection and Ranging): El levantamiento topográfico con tecnología LiDAR fue facilitado para la investigación por la Fundación Biocuenca. Esta tecnología incluye un sensor ZENMUSE L1 y RGB, que integra un módulo Livox LiDAR, una IMU de alta precisión y una cámara RGB CMOS de 1 pulgada, todo montado en un cardán estabilizado de 3 ejes.

El módulo Livox LiDAR permite: encuadre LiDAR con hasta un 100% de resultados efectivos en la nube de puntos; rango de detención: 450 m (80% de reflectividad, 0 klx / 190 m (10% de reflectividad, 100 klx); tasa de puntos efectiva: 240.000pts/s; admite 3 devoluciones; modo escaneo de línea y modo de escaneo no repetitivo. (DJI ENTERPRISE, 2023).

La IMU es de altísima precisión, con una exactitud de 0.025° en los ejes de balanceo y cabeceo, y 0.08° en el eje de guiñada. Además, cuenta con un sensor de visión para mejorar la precisión en el posicionamiento, y utiliza una fusión de datos GNSS, IMU y RGB. (ver figura 17).

Figura 17.
Zenmuse L1 LiDAR y RGB



El sensor LiDAR vuela en el dron Matrice 300 RTK de DJI, que puede permanecer en el aire durante unos 60 minutos. Este dron cuenta con una inteligencia artificial avanzada y un sistema que gestiona su estado de vuelo de manera eficiente. Utiliza el sistema OcuSync Enterprise, que le permite transmitir datos a una distancia de hasta 15 km y enviar video en calidad 1080p a través de tres canales. Además, puede cambiar automáticamente entre las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y 5.8 GHz en tiempo real, lo que lo hace más estable al volar en áreas con interferencias. También cuenta con encriptación AES-256, lo que asegura que la información de la misión esté protegida y solo accesible para personas autorizadas.

Este dron está equipado con un innovador sistema de sensores que detectan obstáculos, con un total de 12 sensores de visión estereoscópica, lo que significa que tiene 2 en cada lado. Esto le proporciona una cobertura de 360°, lo que lo convierte en uno de los más seguros del mercado para volar. Además, puedes ajustar la distancia de seguridad entre el dron y cualquier obstáculo, lo que facilita su uso en espacios más pequeños de lo habitual. Su diseño está certificado con IP45, lo que mejora su resistencia al agua y al polvo, permitiéndole volar en una variedad de condiciones. (Fundación Biocuenca, 2023).

Figura 18.

Dron matrice 300 RTK de DJI



La tecnología Dron Matrice 300 RTK de DJI + Sensor LiDAR Zemnuse L1 de DJI, se complementa con **la estación D-RTK2** de DJI. Esta estación móvil es el receptor GNSS de alta precisión actualizada de DJI que admite todos los principales sistemas de navegación satélite del mundo y proporciona correcciones diferenciales en tiempo real que genera datos de posicionamiento a nivel centimétrico para mejorar la precisión relativa. (figura 19)

Figura 19.

Estación D-RTK2 de DJI + Leica GPS 1200



Elementos de Protección Personal (EPP): Son dispositivos, accesorios y vestimenta diseñados para proteger la salud y seguridad de los trabajadores en su entorno laboral. Estos elementos incluyen casco y botas punta de acero. Su uso es fundamental para minimizar los riesgos asociados con las tareas realizadas en campo. (figura 20)

Figura 20.

EPP

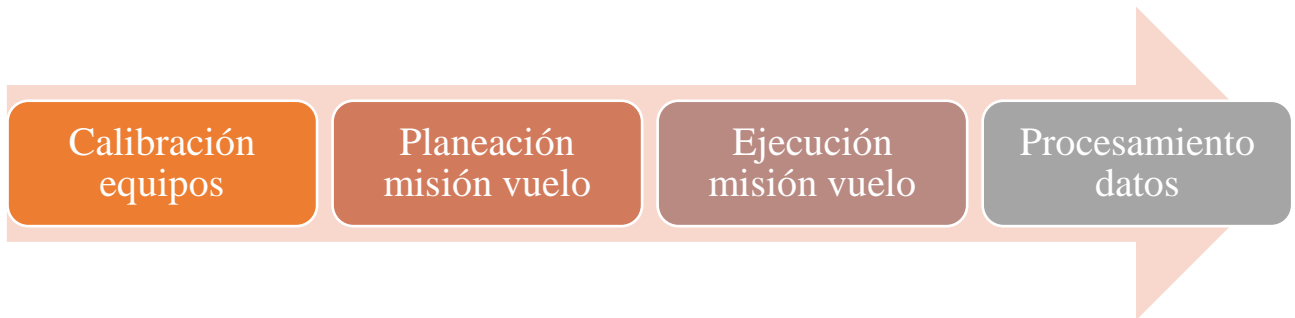


2.2.4 Procedimiento levantamiento topográfico

A continuación, se presenta un esquema en el cual se evidencia el procedimiento a seguir para realizar el levantamiento topográfico mediante tecnología LiDAR, el cual consta de 4 pasos básicos:

Figura 21.

Esquema del procedimiento del levantamiento topográfico



Primero, se ubicó la estación en un área despejada. Luego, se estableció la conexión entre el dron y la estación utilizando las cuatro antenas del dron. Es importante asegurarse de que la tarjeta de memoria esté en buen estado y que el sensor de posición (IMU) esté a una temperatura adecuada. Además, el sensor debe calentarse correctamente antes de iniciar el vuelo.

Tabla 2.

Parámetros de planeación de vuelo

Parámetro	Valor
Superposición lateral	55%
Superposición Frontal	75%
Área seguridad	10m
Retorno laser	3
Parámetro	Valor
Adición de color nube de puntos	Si
Velocidad	6.5 m/s
Puntos	291 m2
Altura de vuelo	20 m respecto a la superficie del terreno

Figura 22.
Delimitación del área



Figura 23.
Recorrido del dron



Una vez definidos los parámetros como se muestra en las figuras 22 y 23, se llevó a cabo el vuelo, que duró en total 18 minutos. Al despegar, el dron comienza con la calibración del sensor de posición (IMU) mientras está en el aire, y luego realiza el levantamiento aéreo. (ver figura 24)

Figura 24.
Vuelo



2.2.5 Procedimiento para procesamiento de datos LiDAR

Todo el procesamiento de los datos se realiza en el software DJI-Terra, esto permite obtener la topografía del terreno.

Primero, se revisan los datos recolectados el día del levantamiento, con el fin de verificar su precisión y calidad, así como identificar posibles errores o inconsistencias que puedan afectar el análisis posterior. Luego, la información se divide en dos partes: Registro fotográfico y los datos almacenados en formatos digitales. Cada archivo contiene secciones de la nube de puntos y del modelo que se va a construir. (ver figura 25)

Figura 25.

Ubicación de estación RTK y asignación de parámetros para reconstrucción de nube de puntos LiDAR

Sistema de coordenadas

Sistemas de c... WGS 84 [Búsqueda](#)

Lista de datos

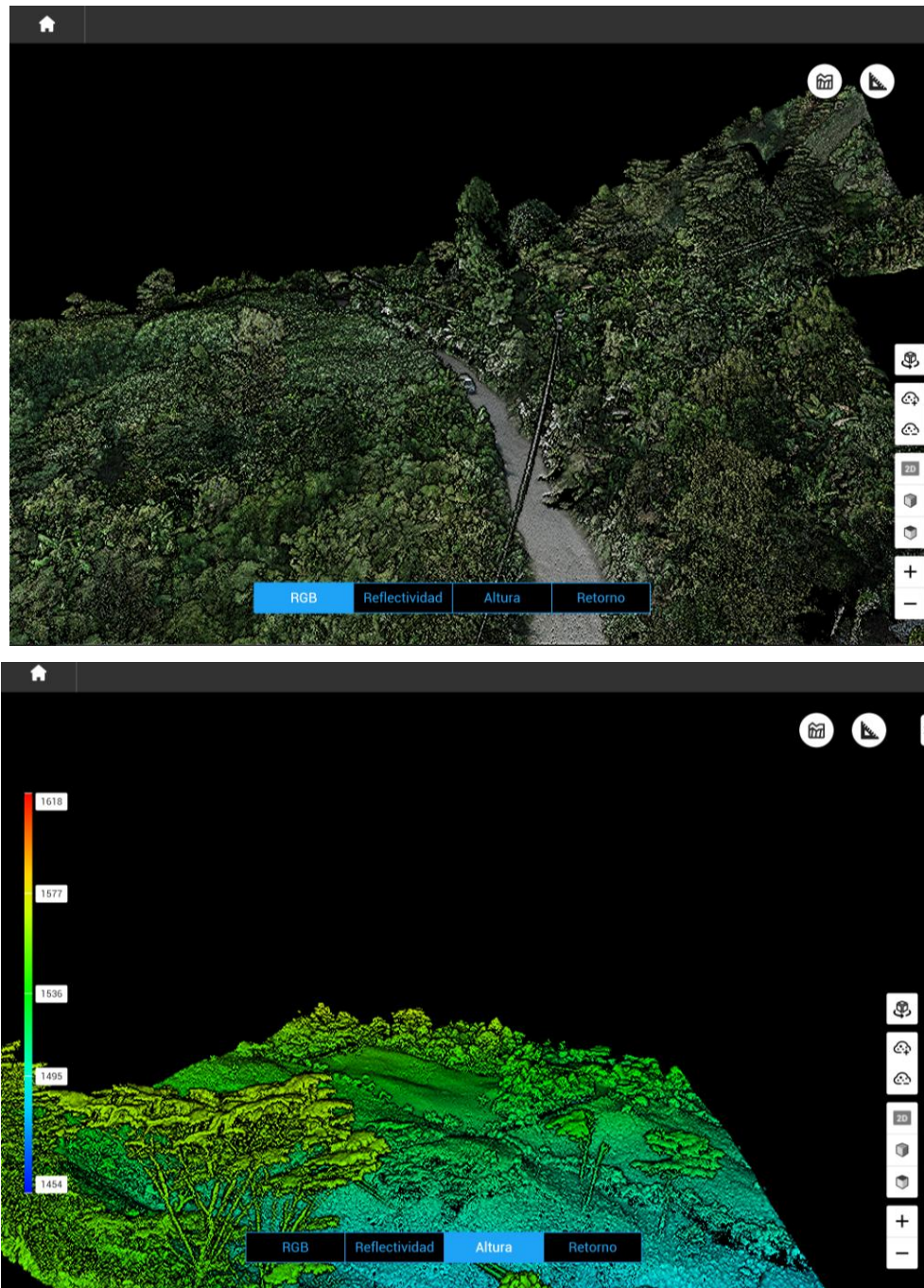
Latit... 0 Lon... 0 Altit... 0 Edición ...

<input type="checkbox"/>	N.º	Nombre de carpeta	Punto central	
<input checked="" type="checkbox"/>	1	DJI_202402241601_078_Zenmuse-L1-m	Latitud:	1.2780004816036195
			Longitud:	-77.4905744461477
			Altitud:	1531.6409897822887

Dado que los programas de procesamiento de nubes de puntos utilizan el formato estándar ".last" (punto last), reconocido a nivel mundial, lo primero que se hizo fue convertir los datos en bruto a este formato. En el caso específico de esta investigación, los datos obtenidos por el sensor LiDAR de la marca DJI se transforman usando el software DJI-Terra. (ver figura 26)

Figura 26.

Resultado reconstrucción de nube de puntos LiDAR formato LAS



A continuación, se clasifica la nube de puntos creando un proyecto en Spatix, como se muestra en la figura 27. En este paso, se cargan tanto la nube de puntos como las trayectorias de vuelo, asignando las coordenadas correspondientes.

Figura 27.
Creación de proyecto en spatix

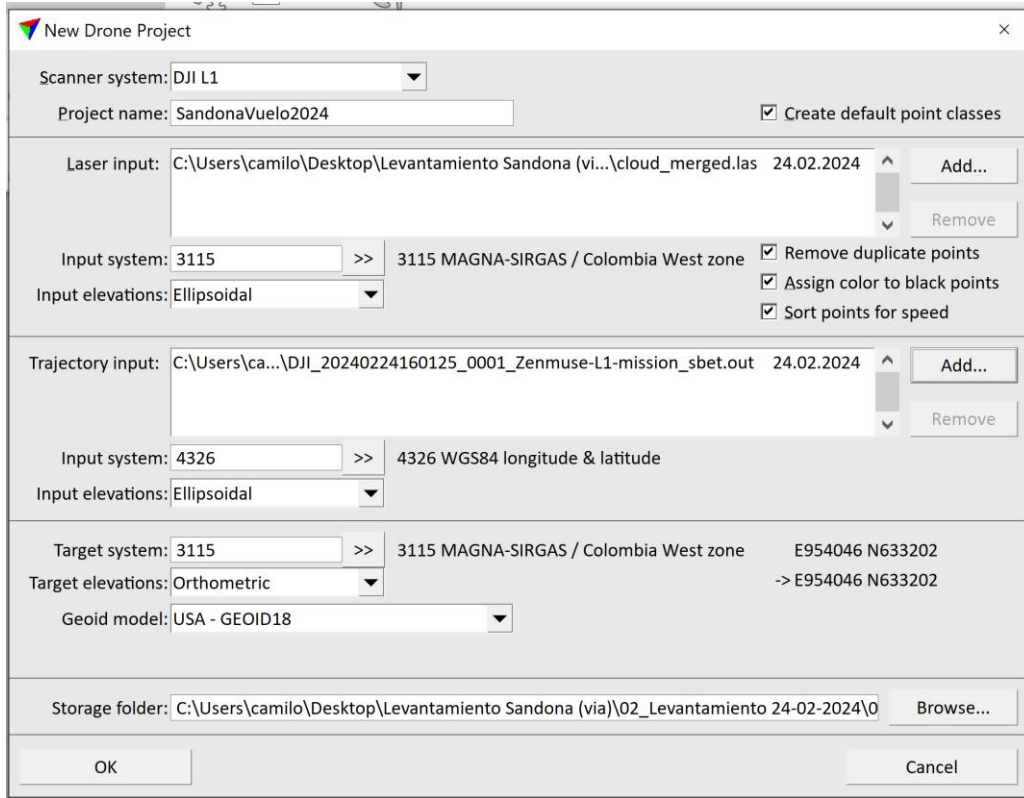


Figura 28.
Comparación de color vs trayectorias de vuelo

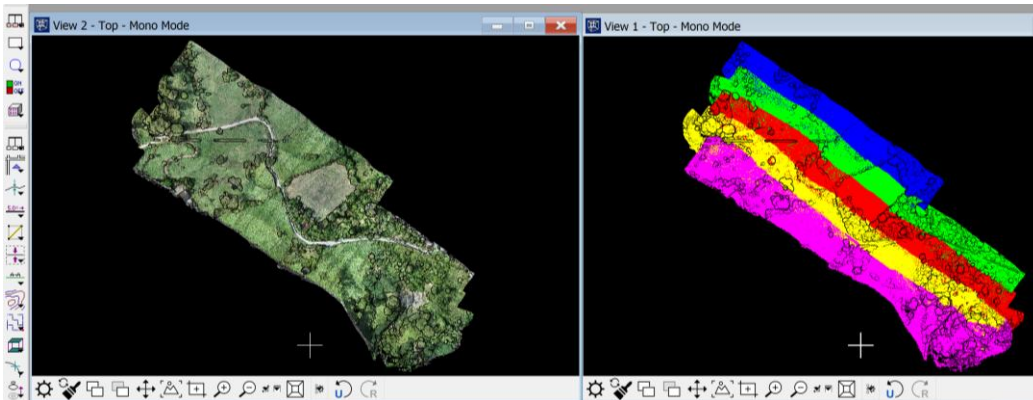
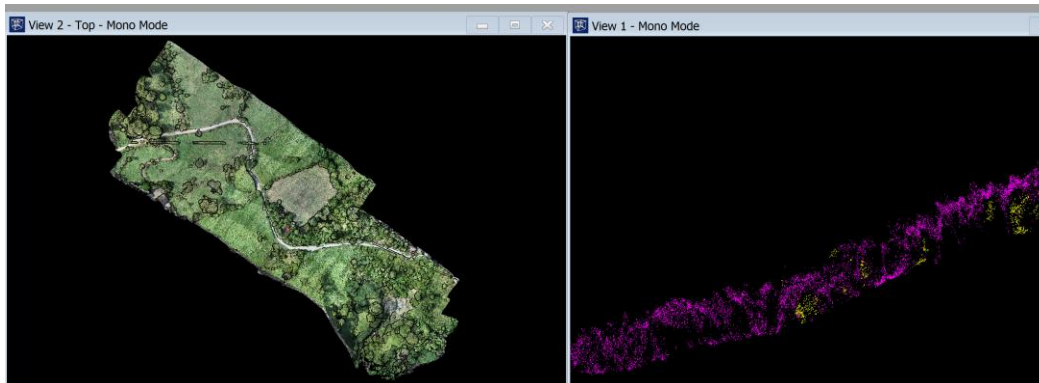


Figura 29.

Recorte de overlape, suavizado y reducción de punto de ruido



Nota: Nube optimizada

Para clasificar la nube de puntos se utilizan varios programas. Dentro del módulo de Terra Modeler, se integran tres herramientas: Terra Modeler, que crea un modelo 3D del terreno; Terra Match, que se usa para unir nubes de puntos; y Terra Scan, que realiza un escaneo de la nube de puntos y facilita la clasificación de estos puntos.

Figura 30.

Clasificación de puntos de terreno

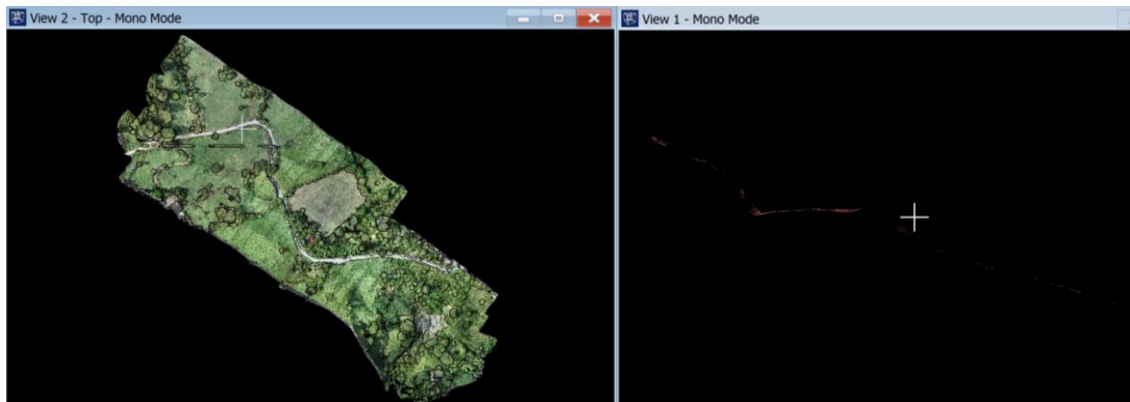


Figura 31.

Creación de modelo digital de elevaciones con Global Mapper

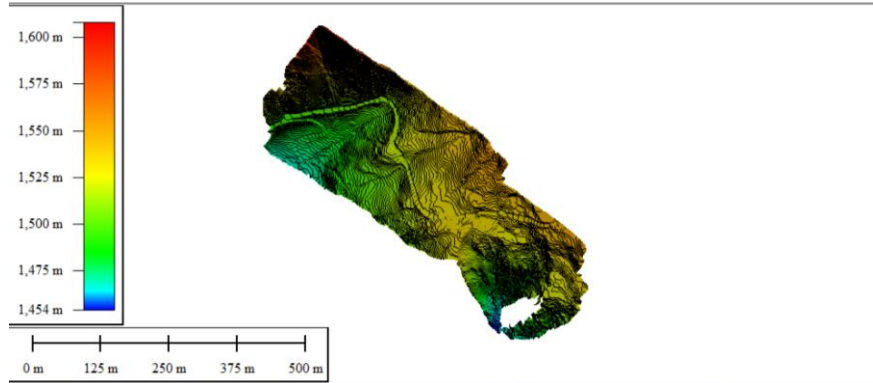
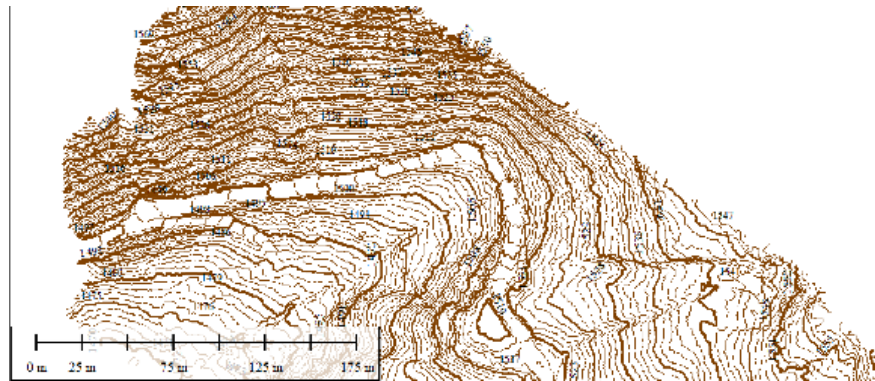


Figura 32.

Generación de curvas de nivel



2.3 Metodología objetivo 2

El segundo objetivo específico corresponde a: “Comparar los modelos digitales del terreno (MDT) obtenidos del sensor LiDAR con resultados previos mediante un análisis multitemporal haciendo uso de Civil 3D”, se consideró el siguiente plan de trabajo.

2.3.1 Generación de la nube de puntos

La generación de Modelos Digitales del Terreno (MDT) a partir de datos LiDAR es una técnica altamente efectiva en la cartografía. Mediante el uso de la tecnología LiDAR, se realiza un escaneo tridimensional del terreno en el corregimiento de Roma - Chavez, capturando una densa nube de puntos que representa la superficie del terreno sin la interferencia de la vegetación u otras estructuras. Estos puntos son clasificados como pertenecientes al terreno o no, y posteriormente se

utilizan para generar un modelo digital del terreno que proporciona información detallada sobre la topografía de la zona.

Para la visualización de la nube de puntos se hace uso del aplicativo de Global Mapper.

Figura 33.

Nube de puntos - ortofoto



2.3.2 Civil 3D

Civil 3D ofrece herramientas avanzadas para el procesamiento, limpieza y clasificación de puntos LiDAR; estas operaciones son esenciales para obtener modelos digitales de elevación (MDE) precisos y confiables, que reflejen con exactitud la topografía del área de estudio y los taludes presentes.

Aprovechando la capacidad de Civil 3D para trabajar con datos multitemporales, se han analizado nubes de puntos LiDAR de diferentes épocas, lo que ha permitido detectar cambios y movimientos en los taludes a lo largo del tiempo. Este análisis multitemporal es fundamental para comprender la dinámica de los taludes, identificar áreas críticas y formular estrategias adecuadas de estabilización.

2.3.2.1 Método de mallas en Civil 3D

El punto de partida del método de mallas es la creación de una malla base, la cual se define mediante una red irregular de triángulos (TIN - Triangulated Irregular Network). Esta malla base

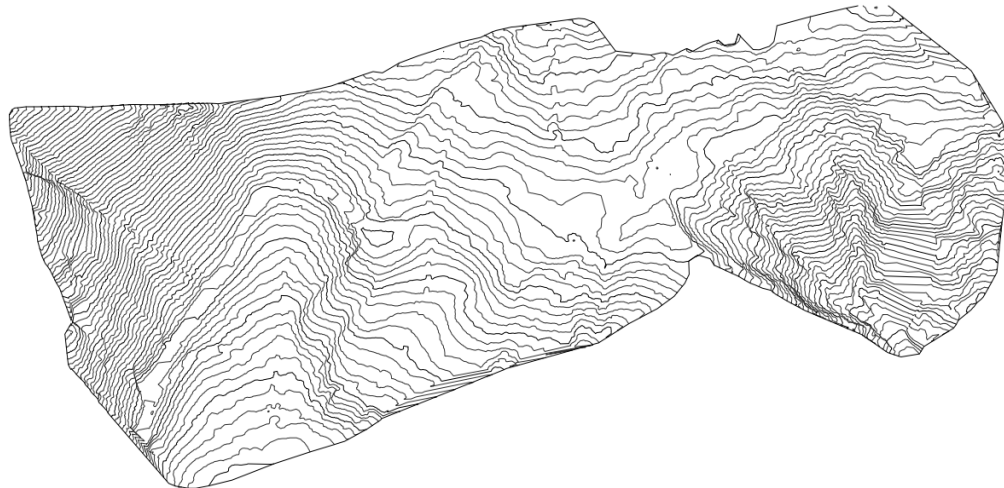
se construye a partir de líneas características, puntos de quiebre y límites del área de trabajo, los cuales son importados desde la nube de puntos. Una vez establecida la malla base, Civil 3D permite la incorporación de datos de elevación provenientes de diversas fuentes. Estos datos son extraídos de la nube de puntos LiDAR, además que, estos datos de elevación se interpolan dentro de la malla base, generando una superficie tridimensional que representa con gran precisión la geometría del terreno.

Con la malla de superficie creada y refinada, Civil 3D ofrece una amplia gama de herramientas de análisis; se generan curvas de nivel a intervalos específicos, se calcula pendientes y orientaciones, se determinan volúmenes de corte y relleno y permite visualizar secciones transversales y perfiles.

Finalmente, Civil 3D ofrece potentes funciones de renderizado y visualización de las mallas de superficie; se pueden aplicar sombreado de relieves, generar mapas de pendientes y orientaciones, obtener vistas en 3D realistas, personalizar estilos visuales y exportar a formatos de visualización e impresión. (ver figura 33)

Figura 34.

Mapa isométrico del área de estudio



2.3.2.2 Modelo digital de terreno (MDT)

En Civil 3D, se utilizan las herramientas de creación de superficies a partir de nubes de puntos para generar los MDT, se selecciona la nube de puntos LiDAR previamente procesada y limpiada que corresponde al período de tiempo actual, se configura los parámetros de creación de la superficie, como el estilo de superficie, la adición de líneas de ruptura, el tamaño máximo de triángulo, entre otros; para finalmente genera una malla TIN que representa fielmente la superficie del terreno a partir de los puntos LiDAR seleccionados.

2.3.3 Tabla de Varnes

En la figura 34 se encuentra la tabla de Varnes, la cual proporciona una guía para la evaluación de los riesgos asociados con los movimientos en masa en el corregimiento de Roma - Chavez. Esta tabla, que clasifica los movimientos en masa según su velocidad y tipo de material, permitirá una comprensión más profunda de la naturaleza y el comportamiento de estos fenómenos en el área de estudio.

Figura 35.

Clasificación de la velocidad del deslizamiento y el daño potencial correspondiente.

Clase de velocidad	Descripción	Velocidad (mm/seg)	Velocidad Típica	Probable significado destructivo.
7	Extremadamente rápido	5×10^3	5m/seg	Catástrofe de gran violencia; edificios destruidos por impacto de material desplazado; muchas muertes; escapar improbable.
6	Muy rápido	5×10^1	3m/min	Algunas vidas se perdieron; Velocidad demasiado grande para permitir que todas las personas escapen.
5	Rápido	5×10^{-1}	1.8m/hr	Evacuación de escape posible, estructuras; posesiones y equipos destruido.
4	Moderado	5×10^{-3}	13m/mes	Algunas estructuras temporales e insensibles se pueden mantener temporalmente.
3	Lento	5×10^{-5}	1.6m/año	Se pueden realizar construcciones de recuperación durante el movimiento, las estructuras insensibles se pueden mantener con trabajos de mantenimiento frecuentes si el movimiento total no es grande durante una fase de aceleración particular.
2	Muy lento	5×10^{-7}	15mm/año	Algunas estructuras permanentes no dañadas por el movimiento.
	Extremadamente lento			Imperceptible sin instrumentos; construcción POSIBLE CON PRECAUCIONES

Fuente: Cruden Y Varnes, 1996.

2.4 Metodología objetivo 3

El tercer objetivo específico corresponde a: “Proponer estrategias de estabilización de taludes mediante obras de contención con el uso de Geo 5 que garanticen una mayor seguridad para la población e infraestructura local.”, se consideró el siguiente plan de trabajo.

En áreas montañosas o con pendientes pronunciadas, la estabilidad de los taludes es un factor crítico que representa un riesgo significativo para la población e infraestructura local. Los deslizamientos de tierra pueden ocasionar daños materiales, pérdidas económicas y, en casos extremos, pérdidas de vidas humanas. Por lo tanto, es fundamental proponer estrategias efectivas de estabilización de taludes mediante obras de contención adecuadas.

2.4.1 Civil 3D para diseños viales

Civil 3D es una herramienta integral y potente para el diseño de vías, que abarca todos los aspectos cruciales del proceso de ingeniería vial. Su capacidad para el modelado del terreno es excepcional, permitiendo crear superficies detalladas a partir de diversos tipos de datos y realizar análisis topográficos complejos. Esto proporciona una base sólida para el diseño geométrico posterior.

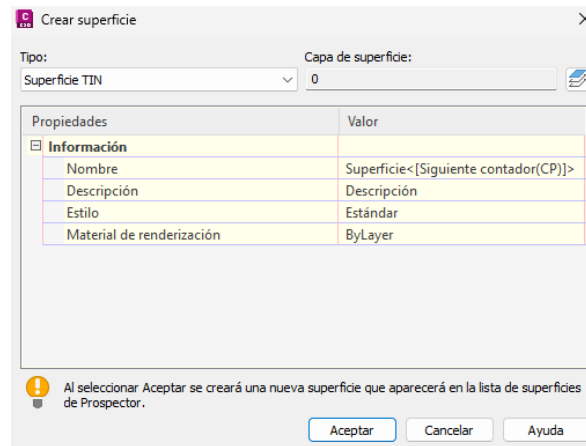
En el ámbito del diseño geométrico, Civil 3D sobresale por su precisión y flexibilidad. Permite crear alineaciones horizontales y perfiles longitudinales con un control minucioso, adaptándose a las normas de diseño más exigentes. La generación automática de peraltes y sobreechornos simplifica tareas que tradicionalmente eran laboriosas, ahorrando tiempo y reduciendo errores.

La creación de secciones transversales y corredores en Civil 3D lleva el diseño vial a un nuevo nivel de detalle y realismo. Las secciones tipo pueden personalizarse para incluir múltiples elementos, y el software genera automáticamente un modelo 3D completo de la vía, ajustándose dinámicamente a las condiciones cambiantes del terreno.

2.4.1.1 Procedimiento del diseño geométrico de carreteras

Como primer paso, se necesita la nube de puntos general para generar las curvas de nivel en el aplicativo de civil 3D, para que con ello conformar una superficie y definir las cuevas de nivel dentro de los puntos obtenidos del levantamiento topográfico realizado con el dron LiDAR.

Figura 36.
Creación de superficie



Luego de crear la superficie, pasamos a crear y a definir las curvas de nivel y los grupos de puntos existentes, como se muestra en la figura 37.

Figura 37.
Menú Civil 3D para creación de superficies de trabajo

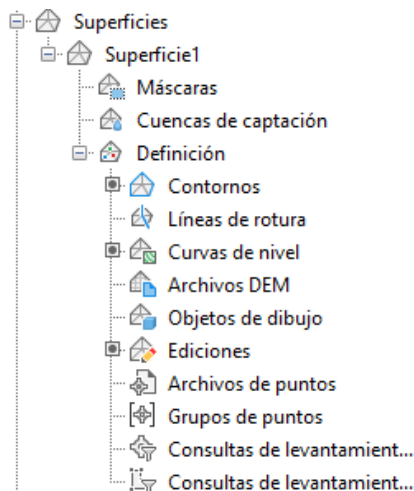
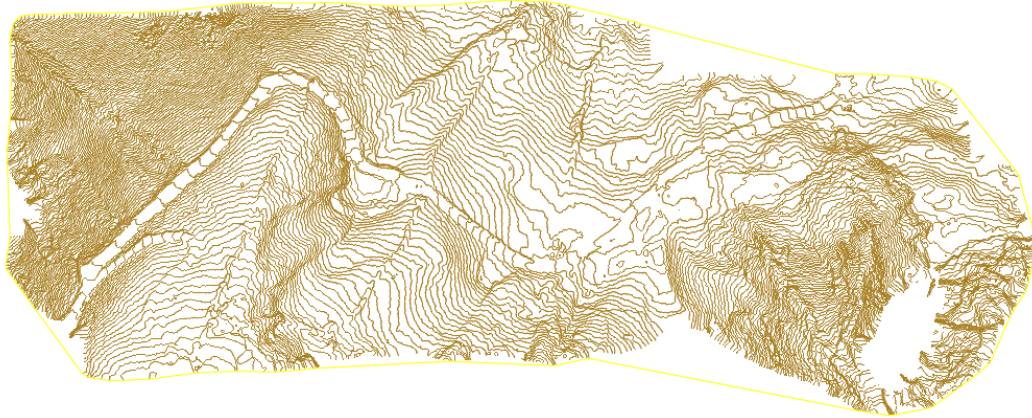


Figura 38.
Curvas de nivel para diseño geométrico de carretera



Una vez definido el terreno a trabajar, pasamos a crear el alineamiento para el eje de la carretera con el fin de establecer el recorrido exacto que seguirá la vía, definiendo su ubicación precisa en el terreno; consiguiendo a eso, ajustamos los parámetros o normas del diseño basándonos en la Norma técnica colombiana INVIAS 2008.

Figura 39.
Creación de alineamiento

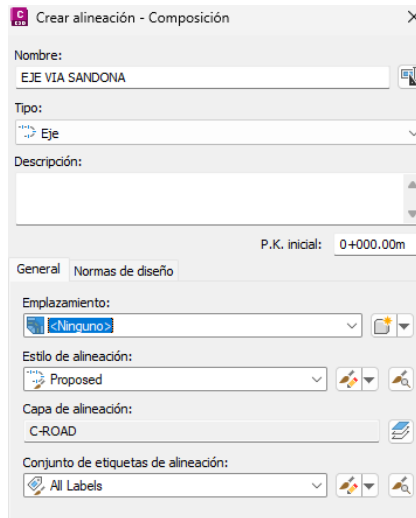


Figura 40.
Asignación de velocidad y norma de diseño

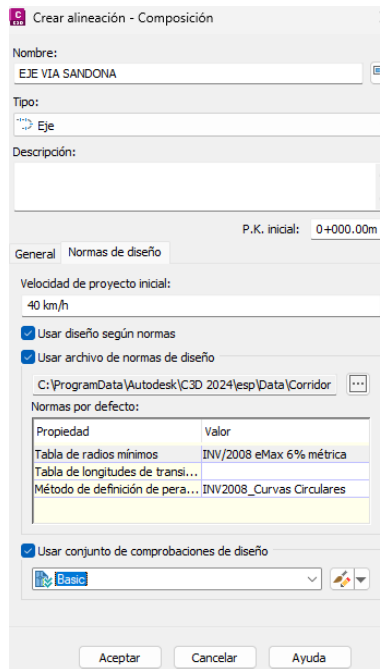
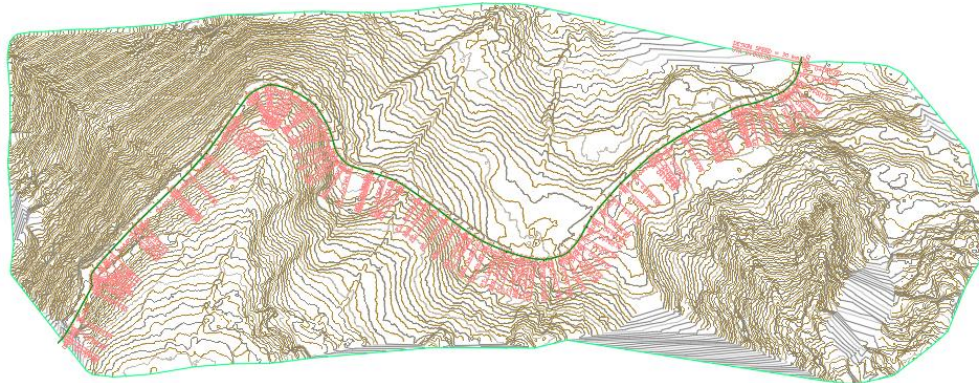


Figura 41.
Eje principal de la carretera



Siguiente a esto, se crea el perfil de la carretera, esto permite ajustar la vía a la topografía existente, definiendo cómo la carretera se eleva o desciende a lo largo de su recorrido y, por otra parte, define las pendientes longitudinales de la vía, asegurando que sean adecuadas para el tráfico previsto; una vez creado el perfil con los parámetros correctos y los intervalos establecidos, pasamos a hacer la visualización del mismo.

Figura 42.
Creación del perfil

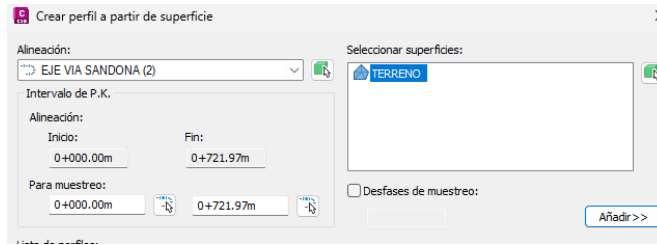


Figura 43.
Creación visual del perfil

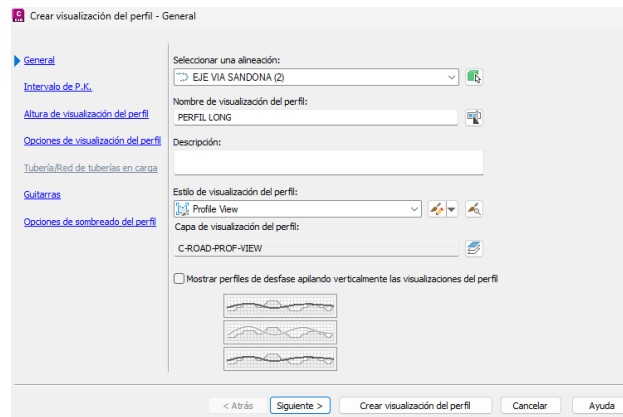


Figura 44.
Perfil longitudinal



Consiguiente a esto, trazamos la subrasante en el perfil longitudinal de la carretera la cual establece la altura exacta de la superficie de rodadura a lo largo de todo el trayecto, continuamos entrando al apartado de propiedades del perfil longitudinal para identificar el área de desmonte y el área de terraplén para futuros cálculos.

Figura 45.
Creación de rasante

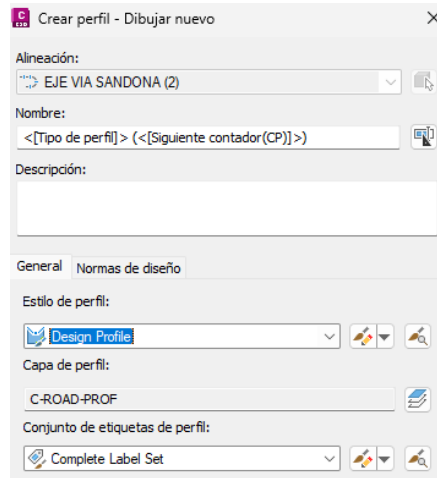


Figura 46.
Rasante junto áreas de desmonte y terraplén



Con el perfil y la rasante creada, se procede a crearse los bordes de la carretera, para empezar a darle una forma concisa y exacta al diseño.

Figura 47.
Bordes de la carretera

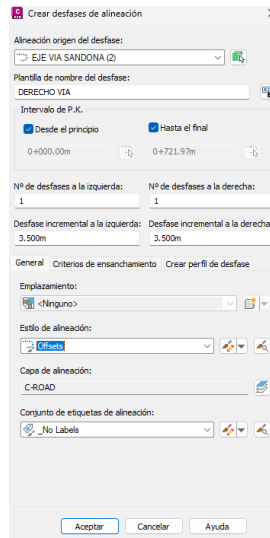
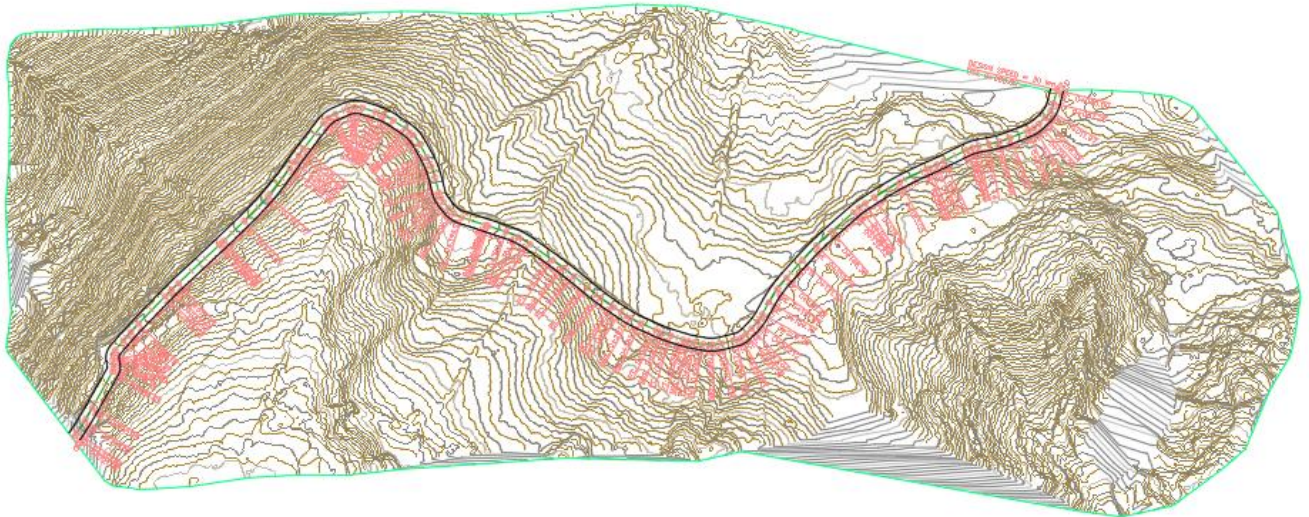
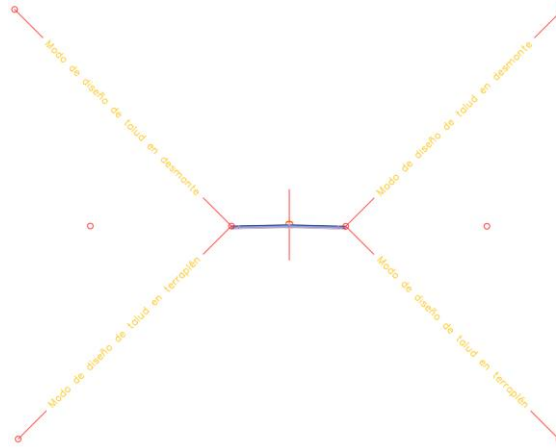


Figura 48.
Vista en planta con alineamiento y bordes de la carretera



Para la creación de la calzada como tal, se crea la sección típica como se evidencia en la figura 49

Figura 49.
Sección típica



Seguimos con la creación del corredor, el cual permite crear un modelo 3D completo de la vía, combinando el alineamiento horizontal, el perfil vertical y las secciones transversales. Esto proporciona una representación visual precisa y completa del diseño.

Figura 50.
Creación del corredor

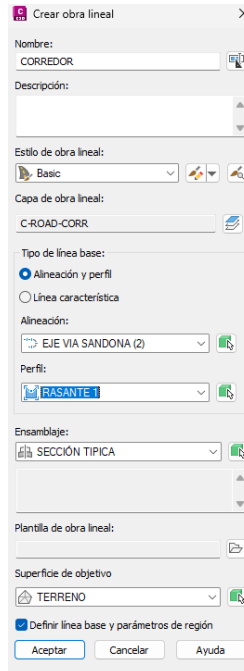
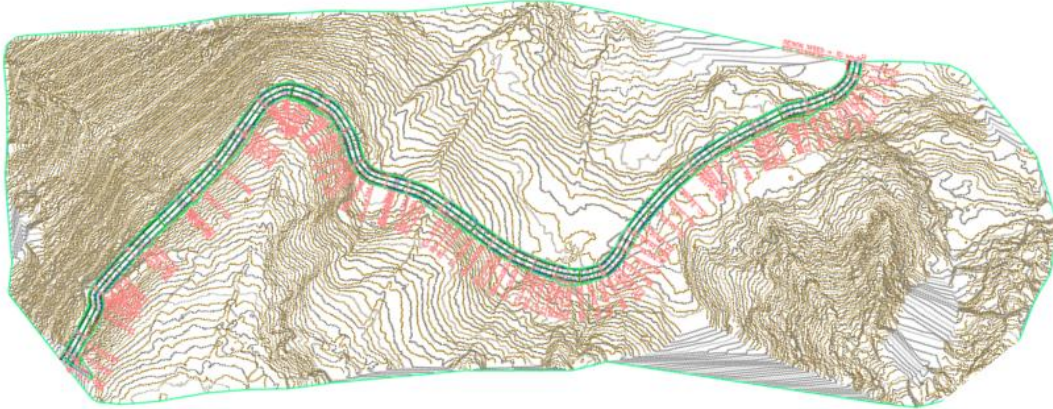


Figura 51.
Vista en planta con corredores



Se hace una línea de muestreo para la creación de las vistas de las secciones transversales por cada 10 metro las cuales son fuente importante para la elección de las zonas que requieren una obra de contención

Figura 52.
Creación de línea de muestreo

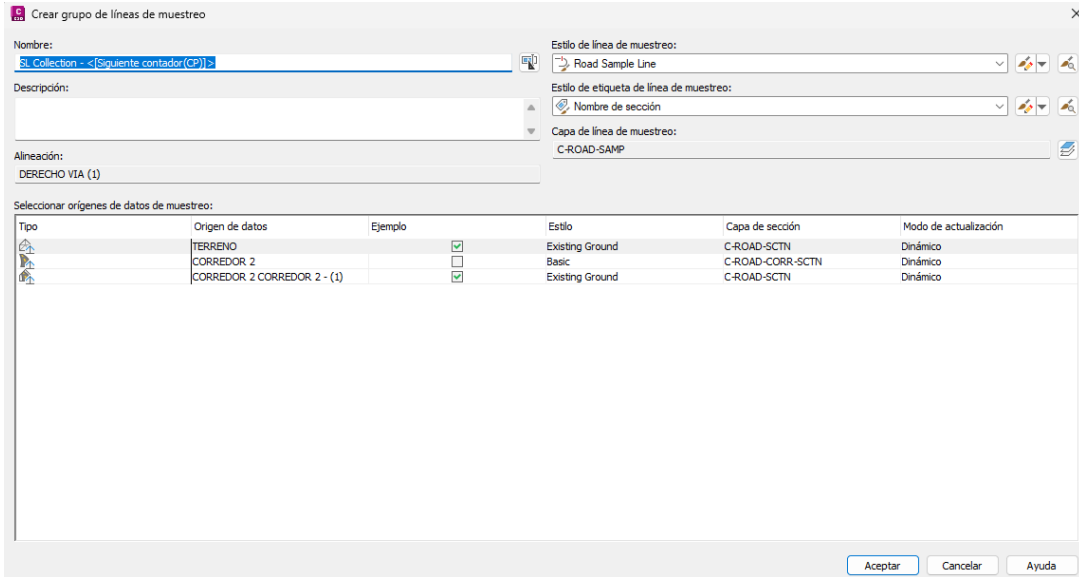
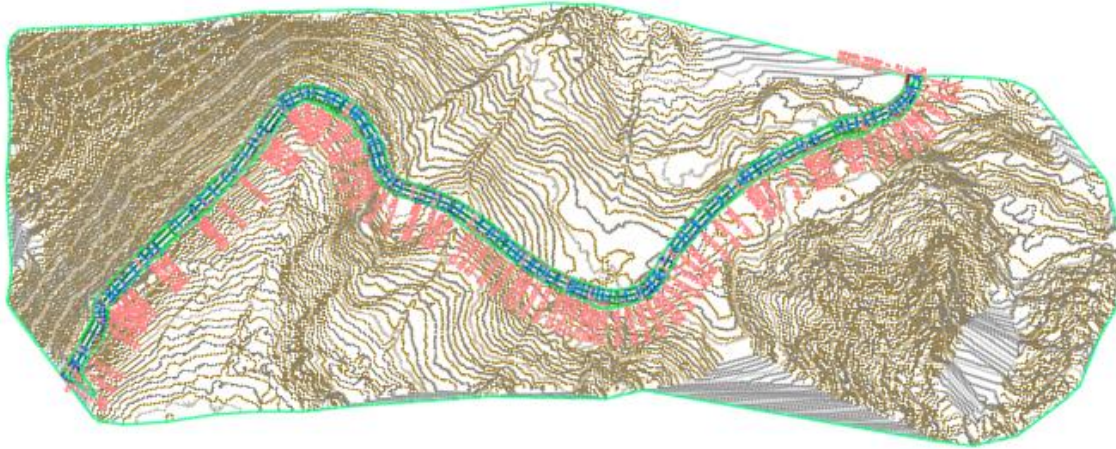


Figura 53.
Vista en planta de los perfiles a graficar



Por último, se crean varias vistas en la sección para la visualización tanto del terreno como de la carretera, para hacer la evaluación de en qué sectores se requiere la implementación de obras de contención para darle una estabilidad a los taludes presentes dentro del área de estudio.

Figura 54.
Creación de varias vistas de sección

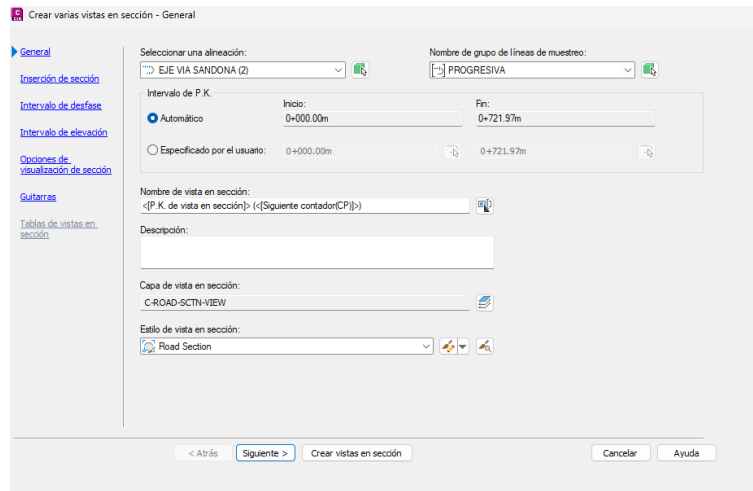
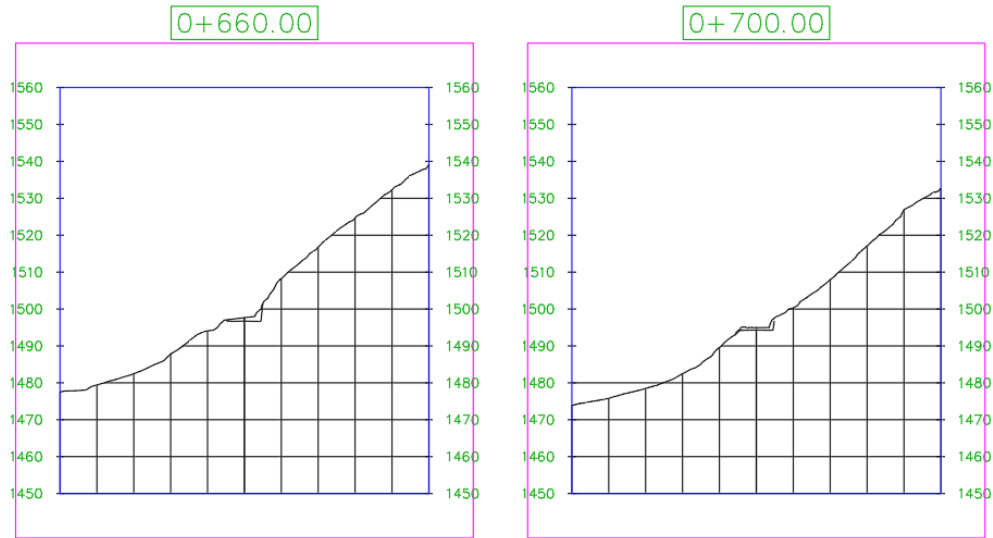


Figura 55.
Secciones transversales



2.4.2 Geo 5

El software Geo 5 es una herramienta poderosa y ampliamente utilizada en la ingeniería geotécnica para el análisis de estabilidad de taludes y el diseño de obras de contención. Este programa permite modelar con precisión la geometría del talud, incorporando los datos topográficos y geotécnicos recopilados. Geo 5 ofrece una amplia gama de métodos de análisis, como Bishop, Janbu o Morgenstern-Price, para evaluar el factor de seguridad del talud y determinar si cumple con los requisitos de estabilidad definidos.

El software permite explorar diferentes alternativas de estabilización, como muros de contención, anclajes, bermas o sistemas de drenaje, y evaluar su impacto en el factor de seguridad. Geo 5 también facilita el diseño detallado de la solución seleccionada, proporcionando herramientas para calcular dimensiones, materiales y especificaciones técnicas de la obra de contención. La capacidad de modelar y analizar diversas opciones en un entorno virtual permite proponer estrategias de estabilización más efectivas y seguras antes de su implementación.

2.4.2.1 Recopilación de información.

En cuanto a la información topográfica del área de interés, se cuenta con datos de alta precisión obtenidos mediante el uso de la tecnología LiDAR; Los datos obtenidos proporcionan una representación detallada de la geometría del talud, incluyendo su altura, pendiente, irregularidades y características topográficas relevantes. Esta información topográfica precisa es fundamental para crear un modelo preciso del talud en el software Geo 5, lo que permitirá realizar análisis de estabilidad más confiables y proponer soluciones de estabilización más efectivas.

2.4.2.2 Evaluación de alternativas de estabilización

Después de analizar la información topográfica, es fundamental explorar diferentes alternativas de obras de contención. Geo 5 ofrece la posibilidad de modelar y evaluar una amplia gama de soluciones.

Para cada alternativa de estabilización se crea un modelo detallado en Geo5, incorporando la geometría del talud, las propiedades geotécnicas del suelo y los parámetros específicos de la obra de contención propuesta. El software permite realizar análisis de estabilidad utilizando los métodos anteriormente mencionados para así, determinar el factor de seguridad resultante después de implementar cada solución. Geo 5 facilita la optimización del diseño, lo que permite crear y comparar las diferentes opciones. Por otro lado, se deben considerar los posibles efectos ambientales, como la alteración del paisaje, la afectación de ecosistemas locales o la generación de residuos durante la construcción. Finalmente, se puede realizar una comparación objetiva y seleccionar la alternativa más adecuada para el proyecto específico.

2.4.2.3 Selección de estrategia de estabilización.

El impacto ambiental de cada alternativa debe ser considerado. Algunas estrategias de estabilización pueden tener un mayor impacto en el entorno natural, además, el costo de implementación de cada estrategia de estabilización juega un papel fundamental en la selección final. Es necesario evaluar cuidadosamente los costos asociados a los materiales, la mano de obra, el transporte y cualquier otro gasto relacionado con la construcción de la obra de contención propuesta.

El factor de seguridad calculado para cada alternativa es uno de los aspectos más importantes a considerar. La estrategia seleccionada debe proporcionar un factor de seguridad que cumpla con las normas y requerimientos de estabilidad establecidos, garantizando así la seguridad de la población y la infraestructura local.

Después de ponderar cuidadosamente todos estos factores, se selecciona la estrategia de estabilización que mejor equilibre los requisitos técnicos, económicos, ambientales y de construcción. Esta elección debe garantizar una mayor seguridad para la población e infraestructura local, al tiempo que sea viable y sostenible a largo plazo.

2.4.3 Geo 5 para modelación de muros de contención

La metodología presentada a continuación es utilizada para el análisis y diseño de las tres alternativas de estabilización que se quiere modelar: Muro sin pilote y sobredimensionado, muro con pilote 0.5 m de diámetro, y muro con pilote de 1.4 m de diámetro

2.4.3.1 Inicio del Proyecto en GEO 5

Se crea un nuevo archivo, se nombra y describe el proyecto

2.4.3.2 Parámetros de diseño para muros de contención en “CANTIELEVER WALL”

2.4.3.2.1 Análisis del muro

Para iniciar el modelado del muro, se consideran los siguientes datos: el método de diseño se basa en los Factores de Seguridad (ASD), la presión activa se calcula utilizando el criterio de Mohr-Coulomb, la presión pasiva se determina según el método de Müller-Breslau, el análisis sísmico se realiza mediante el enfoque de Mononobe-Okabe, y la excentricidad permitida corresponde a 1/6 de la base.

2.4.3.2.2 Factores de Seguridad

Además, teniendo en cuenta la norma se consideran los siguientes factores:

- Diseño Permanente: Volteo (3), Deslizamiento (1.6), Capacidad Portante (3)
- Diseño Sísmico: Volteo (2.0), Deslizamiento (1.05), Capacidad Portante (1.5)

Figura 56.
Configuración básica

The image shows a software interface for configuring a Cantilever Wall analysis. The window title is "Edit current settings : Cantilever Wall". It features several tabs: "Materials and standards" (selected), "Wall analysis", "Permanent design situation", "Transient design situation", "Accidental design situation", and "Seismic design situation".

Under the "Materials and standards" tab, the following settings are visible:

- Active earth pressure calculation : Coulomb
- Passive earth pressure calculation : Müller-Breslau
- Earthquake analysis : Mononobe-Okabe
- Shape of earth wedge : Calculate as skew
- Base key : The base key is considered as inclined footing bottom
- Allowable eccentricity : 0.166 [-]
- Verification methodology : Safety factors (ASD)
- Reduce parameters of contact base - soil

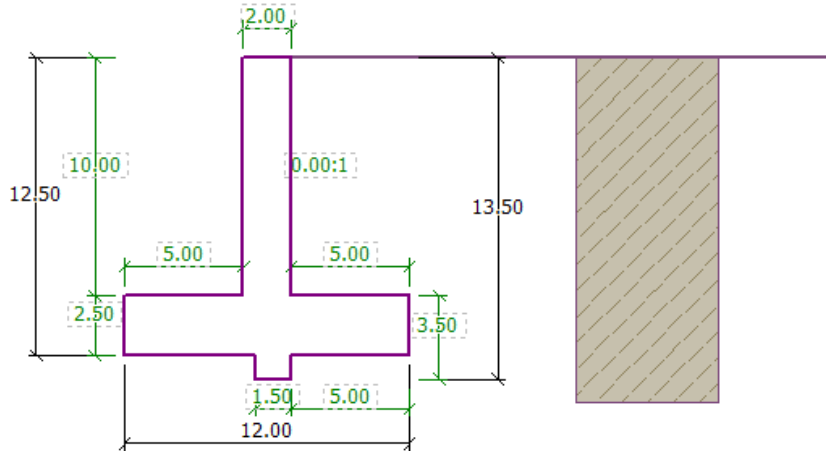
Under the "Permanent design situation" tab, the following safety factors are defined:

- Safety factors
- Safety factor for overturning : $SF_o = 3.00$ [-]
- Safety factor for sliding resistance : $SF_s = 1.60$ [-]
- Safety factor for bearing capacity : $SF_b = 3.00$ [-]

2.4.3.3 Geometría

Se construirá un muro de contención, basado en los datos proporcionados, los aspectos más relevantes de la geometría son: ancho de corona (b), altura del muro (h), ancho de la base (B), altura del contrafuerte (d), y espesor de la base.

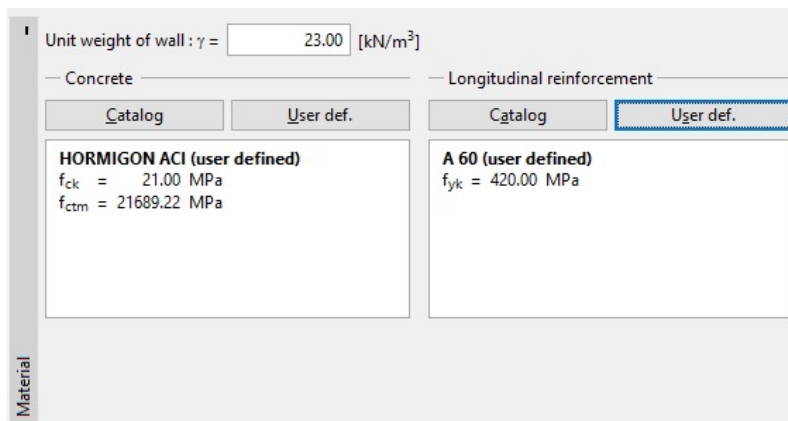
Figura 57.
Geometría del muro



2.4.3.4 Materiales implementados

El muro de contención se construirá con HORMIGON ACI de resistencia a compresión $f_c = 21.00$ MPa y módulo de elasticidad $E_{cm} = 21689.22$ MPa. El refuerzo longitudinal será acero A 60 con resistencia a la fluencia $f_{yk} = 420.00$ MPa. El peso unitario del muro se establece en $\gamma = 23.00$ kN/m³, asegurando una estructura robusta y durable para soportar las cargas previstas.

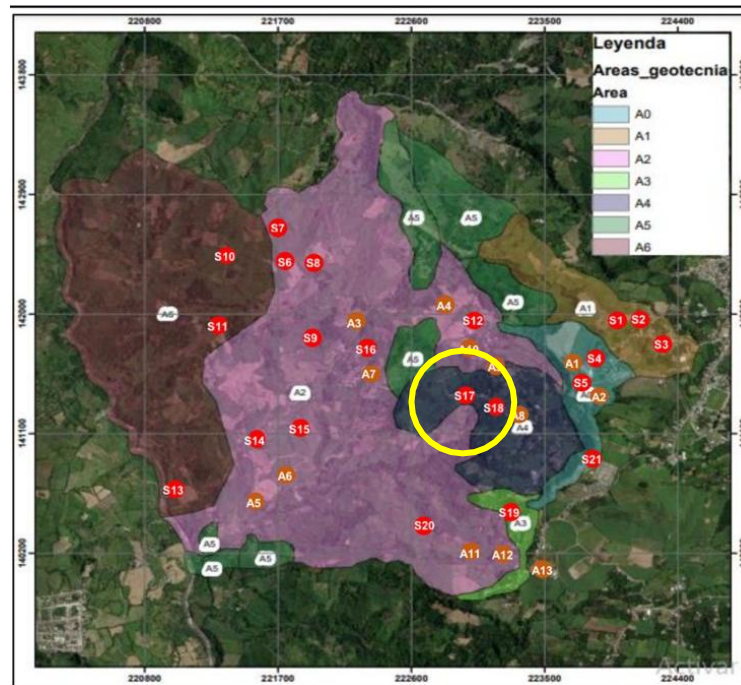
Figura 58.
Material del muro



2.4.3.5 Suelo

Para conocer la caracterización del suelo, se tuvo acceso al estudio de suelo realizado en el año 2022 por COLOBRASLAB titulado: “ESTUDIO DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA, ESCALA 1:5.000 EN VIA DEPARTAMENTAL 17NR06-3 ANCUYA-SANDONÁ (CORREGIMIENTO DE ROMACHAVEZ), DEPARTAMENTO DE NARIÑO” para la FUNDACION BIOCUENCAS, en el cual, se realizaron sondeos en diferentes puntos de la vía. Para este proyecto se tomó en cuenta el sondeo número 17, el cual coincide con el sitio en el que se va a realizar la estabilización.

Figura 59.
Localización de sondeos



En el diseño del muro de contención, se utilizó un suelo clasificado como arena limosa con las siguientes propiedades: peso unitario $\gamma = 18.38 \text{ kN/m}^3$, ángulo de fricción interna $\phi_{ef} = 28.37^\circ$, cohesión $c_{ef} = 37.36 \text{ kPa}$, y ángulo de fricción estructura-suelo $\delta = 21.28^\circ$. Se consideró un estado de esfuerzos efectivos y un suelo cohesivo. Para el cálculo de la presión de levantamiento, se empleó el modo estándar, con un peso unitario saturado $\gamma_{sat} = 18.38 \text{ kN/m}^3$

Figura 60.
Descripción de la muestra

GRANULOMETRÍA POR TAMIZADO CON LAVADO NTC-1522-2000	
PROYECTO:	ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA, ESCALA 1:5.000 EN VÍA DEPARTAMENTAL 17NR06-3 ANCUYA - SANDONÁ (CORREGIMIENTO DE ROMACHAVEZ), DEPARTAMENTO DE NARIÑO
SOLICITÓ:	FUNDACIÓN BIOCUENCAS
UBICACIÓN:	VEREDA ROMA, MUNICIPIO DE SANDONÁ, DEPARTAMENTO DE NARIÑO
FECHA DE RECIBO:	24-oct-2022
SONDEO:	17 MUESTRA: 1 PROFUNDIDAD (m): 2.00-2.50
FUENTE:	IN SITU
DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA:	ARENA LIMOSA COLOR CAFÉ OSCURO FECHA DE ENSAYO: 01-nov-2022
DATOS INICIALES DE LA MUESTRA	
P0: Masa Humeda (g)	152.2
P1: Masa seca (g)	89.2
P2: Masa seco de lavado (g)	46.4
	%Humedad 18.9

Figura 61.
Características del suelo

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

FECHA: 1 DE NOVIEMBRE DE 2022

PROYECTO: ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA, ESCALA 1:5 EN VÍA DEPARTAMENTAL 17NR06-3 ANCUYA-SANDONA

UBICACIÓN: CORREGIMIENTO DE ROMACHAVEZ, DEPARTAMENTO DE NARIÑO

TIPO DE ENSAYO: C.D.

SOLICITA: FUNDACION BIOCUENCAS

MUESTRA: ARENA LIMOSA COLOR CAFÉ OSCURO (SONDEO 17 - DE 2,00 A 2,50m)

P.N.	0,5	1,0	1,5	Kg / CM ²	C = COHESION = 38,1Kg / CM ² * 10 ⁻²
E.C.	66	91	120	Kg / cm ² * 10 ⁻²	C = 0,381 Kg / cm ²
					φ = ANGULO DE FRICCION INTERNA = 28,37°

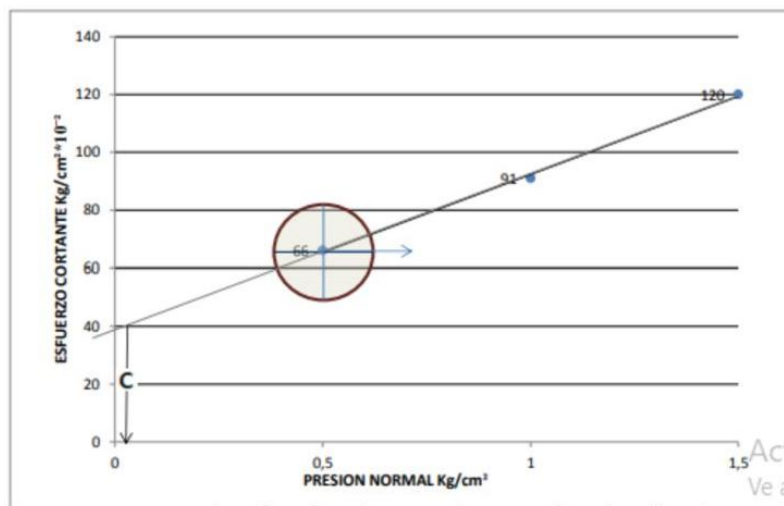


Figura 62.
Peso del suelo

ALTURA DEL MOLDE cms	2,00
DIAMETRO DEL MOLDE cms	4,97
AREA DEL MOLDE cms ²	19,4
VOLUMEN DEL MOLDE cms ³	38,8
HUMEDAD NATURAL	23,11
PESO DEL MOLDE + SUELO HUMEDO gr	145,05
PESO MOLDE gr	72,34
PESO UNITARO HUMEDO gr/cm ³	1,874

Figura 63.
Características del suelo en Geo5

2.4.3.6 Coordenadas superiores del terreno

Se definen tres puntos clave para representar el perfil del terreno y su interacción con el muro de contención. El punto inicial (1) se fija en el origen (0.00, 0.00), representando la base del muro. El punto de corte entre el terreno y la vía (2) se ubica en (8.96, 0.00). El punto medio del terreno

(3) se establece en (32.22, -18.40), describiendo la pendiente natural. Esta configuración simplificada permite modelar eficazmente la geometría del terreno para el análisis y diseño del muro.

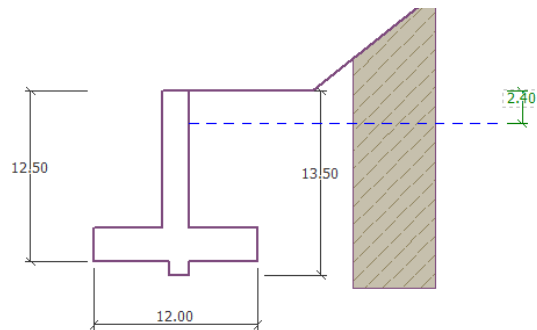
Figura 64.
Coordenadas superiores del terreno



2.4.3.7 Nivel de agua freático

El nivel freático se estableció a 2.40 m de profundidad en el diseño del muro de contención. Este parámetro es fundamental para calcular presiones hidrostáticas y evaluar la estabilidad general de la estructura.

Figura 65.
Nivel freático

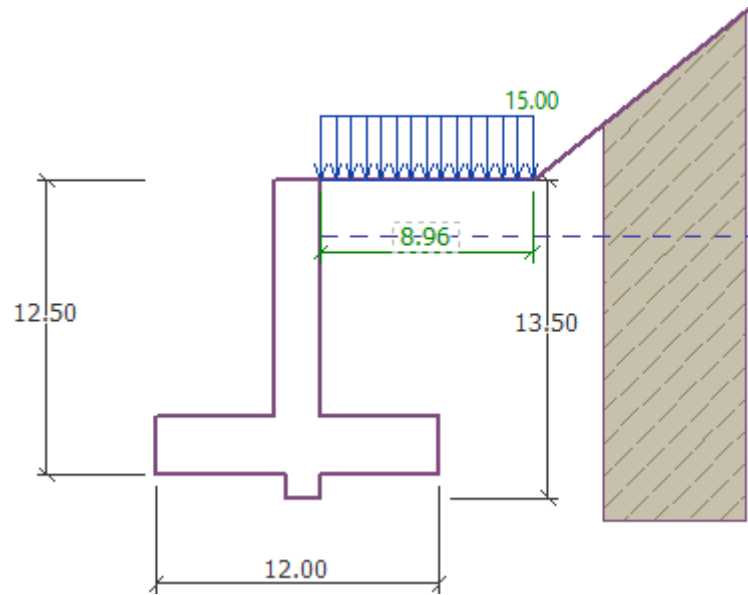


2.4.3.8 Sobrecarga

En el diseño del muro de contención se incorpora una sobrecarga denominada "CARGA VEHICULAR". Esta carga se aplica como una fuerza superficial permanente con una magnitud

de 15 kN/m². Se distribuye en una franja de 8.96 m de ancho sobre la corona del muro, representando el impacto de tráfico vehicular. Esta configuración permite simular de manera realista las cargas adicionales que el muro debe soportar.

Figura 66.
Sobrecarga impuesta



2.4.3.9 Coordenadas inferiores del terreno

En el diseño del muro de contención, se especificaron las coordenadas del terreno para el punto 2, siendo $x_2 = 3.00$ m y $z_2 = 10.00$ m. Estas coordenadas son cruciales para definir la geometría del terreno detrás del muro.

Figura 67.
Coordenadas inferiores del terreno

Parameters of resistance on front face		Terrain parameters		
Resistance type :	passive	$x_1 =$	2.00 [m] $z_1 =$	4.30 [m]
Soil :	ARENA LIMOSA	$x_2 =$	3.00 [m] $z_2 =$	10.00 [m]
Angle of friction struc.-soil : $\delta =$	0.00 [°]	$x_3 =$	2.00 [m] $x_4 =$	10.00 [m]
Thickness :	$h =$	0.50 [m]		
Terrain surcharge :	$f =$	0.00 [kN/m ²]		

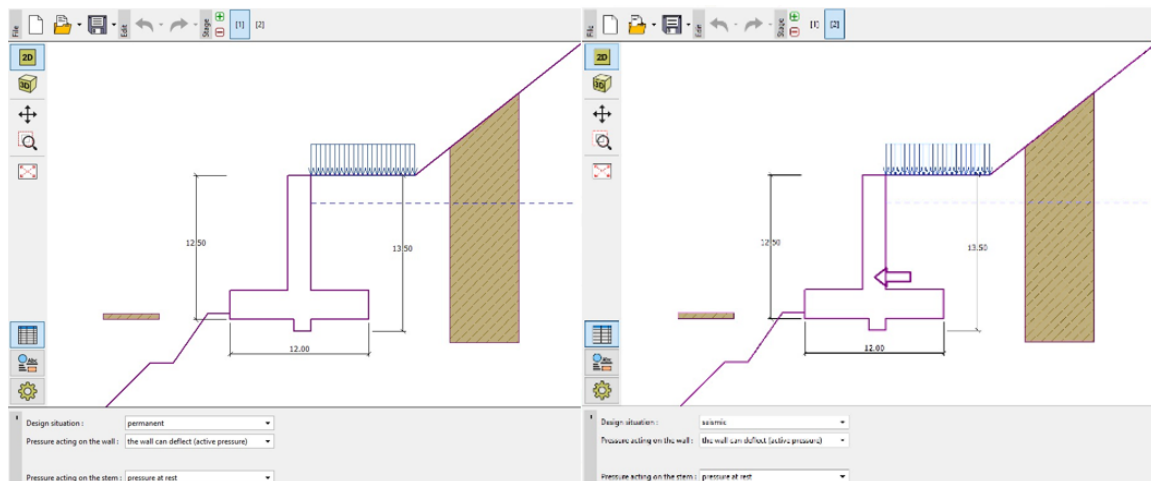
2.4.3.10 Etapas de carga

En el diseño del muro de contención se analizaron dos casos críticos:

- Caso 1 - Situaciones permanentes: Evalúa el muro bajo cargas constantes y condiciones normales de operación.
- Caso 2 - Situaciones sísmicas: Considera el comportamiento del muro durante eventos sísmicos, incluyendo cargas dinámicas adicionales.

Estos casos aseguran que el muro de 13.50 m de altura y 12.00 m de base responda adecuadamente tanto en condiciones estáticas como dinámicas.

Figura 68.
Casos de evaluación



2.4.3.11 Verificaciones de estabilidad del muro

Los combos de cargas desempeñan un papel crucial en los estudios de estabilidad de taludes, permitiendo a los ingenieros geotécnicos evaluar la seguridad y el comportamiento de las estructuras bajo diversas condiciones. Estas combinaciones de cargas simulan escenarios realistas que el talud podría enfrentar durante su vida útil, incluyendo el peso propio del suelo, cargas externas, presiones de agua subterránea y fuerzas sísmicas.

Al aplicar estos combos, los analistas pueden identificar las situaciones más críticas que podrían llevar a la inestabilidad, cumplir con los requisitos normativos de diseño, y mejorar las medidas de mitigación. Además, este enfoque permite considerar las incertidumbres inherentes a las

propiedades del suelo y las condiciones ambientales, proporcionando una evaluación más robusta y confiable de la estabilidad del talud a corto y largo plazo. La implementación adecuada de los combos de cargas no solo mejora la precisión de los análisis, sino que también contribuye significativamente a la seguridad y durabilidad de los proyectos geotécnicos.

Figura 69.
Combos de verificación para condiciones permanentes

No. ^	Force	F _x [kN/m]	F _z [kN/m]	Applic. point		Coeff. [-]
				x [m]	z [m]	
1	Weight - wall	0.00	1184.50	6.01	-3.63	1.300
2	FF resistance	190.09	0.00	0.00	0.15	1.000
3	Weight - earth wedge	0.00	261.49	8.58	-6.70	1.300
4	Active pressure	-59.37	69.52	11.17	-3.96	1.000
5	Water pressure	-510.05	0.00	7.60	-3.37	1.000
6	Uplift pressure	0.00	0.00	7.00	-12.50	1.000
7	CARGA VEHICULAR	-24.61	34.24	10.18	-3.99	2.275
8	CARGA VEHICULAR	0.00	8.95	7.30	-12.50	2.275

No. ^	Force	F _x [kN/m]	F _z [kN/m]	Applic. point		Coeff. [-]
				x [m]	z [m]	
1	Weight - wall	0.00	1184.50	6.01	-3.63	1.300
2	FF resistance	190.09	0.00	0.00	0.15	1.000
3	Weight - earth wedge	0.00	261.49	8.58	-6.70	1.300
4	Active pressure	-59.37	69.52	11.17	-3.96	1.300
5	Water pressure	-510.05	0.00	7.60	-3.37	1.000
6	Uplift pressure	0.00	0.00	7.00	-12.50	1.000
7	CARGA VEHICULAR	-24.61	34.24	10.18	-3.99	2.275
8	CARGA VEHICULAR	0.00	8.95	7.30	-12.50	2.275

No. ^	Force	F _x [kN/m]	F _z [kN/m]	Applic. point		Coeff. [-]
				x [m]	z [m]	
1	Weight - wall	0.00	1184.50	6.01	-3.63	1.300
2	FF resistance	190.09	0.00	0.00	0.15	1.000
3	Weight - earth wedge	0.00	261.49	8.58	-6.70	1.300
4	Active pressure	-59.37	69.52	11.17	-3.96	1.300
5	Water pressure	-510.05	0.00	7.60	-3.37	1.000
6	Uplift pressure	0.00	0.00	7.00	-12.50	1.000
7	CARGA VEHICULAR	-24.61	34.24	10.18	-3.99	1.000
8	CARGA VEHICULAR	0.00	8.95	7.30	-12.50	1.000

Figura 70.
Combo de verificación para condiciones sísmicas

No. ^	Force	F _x [kN/m]	F _z [kN/m]	Applic. point		Coeff. [-]
				x [m]	z [m]	
1	Weight - wall	0.00	1184.50	6.01	-3.63	1.300
2	Earthq.- constr.	-148.06	0.00	6.01	-3.63	1.300
3	FF resistance	190.09	0.00	0.00	0.15	1.300
4	Earthq.- face	-4.53	0.00	0.00	0.00	1.300
5	Weight - earth wedge	0.00	261.49	8.58	-6.70	1.300
6	Earthquake - soil wedge	-64.29	0.00	8.69	-6.19	1.300
7	Active pressure	-59.37	69.52	11.17	-3.96	1.300
8	Water pressure	-510.05	0.00	7.60	-3.37	1.300
9	Uplift pressure	0.00	0.00	7.00	-12.50	1.300
10	Earthq.- act.pressure	-145.19	181.11	9.70	-7.54	1.300
11	CARGA VEHICULAR	-24.61	34.24	10.18	-3.99	0.650
12	CARGA VEHICULAR	0.00	8.95	7.30	-12.50	0.650

2.4.3.12 Dimensionamiento y análisis de acero de refuerzo

En el dimensionamiento del muro de contención, se realizó un análisis detallado del refuerzo de acero para cada componente. Se utilizaron barras No.8 (25.4 mm de diámetro) con un

recubrimiento de 40 mm, distribuidas estratégicamente en el vástago frontal y posterior, el salto y el talón del muro. El diseño resultó satisfactorio en todas las secciones, con el vástago posterior alcanzando un 91.2% de utilización, el salto un 56.4% y el talón un 53.2%. El área de refuerzo proporcionada (5067.1 mm²) superó los requerimientos calculados, garantizando un diseño estructural seguro y eficiente. La implementación de este tipo de barra es porque dentro del análisis de cuantías mínimas de acero, la barra No. 8 fue la ideal debido a que es un muro sobredimensionado y por ende, con una volumen de concreto mayor.

Figura 71.
Análisis estructural y dimensionamiento del muro de contención

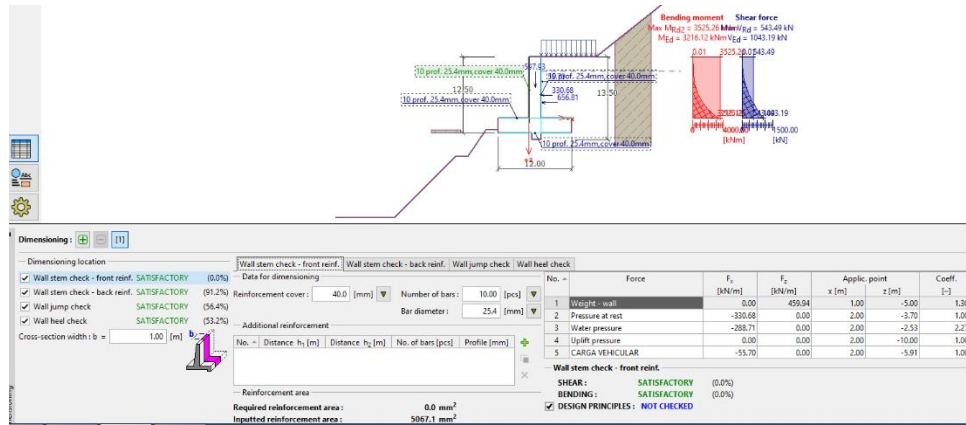


Figura 72.
Verificación del talón del muro y cargas aplicadas

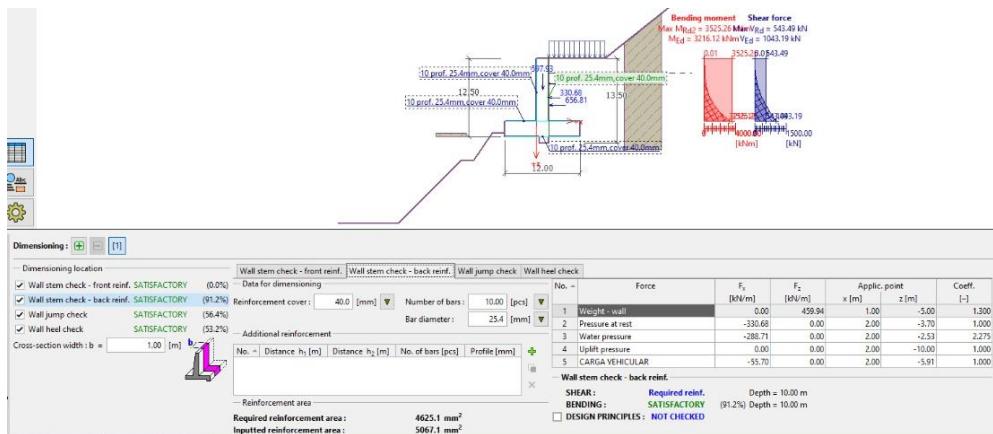


Figura 73.
Análisis del salto del muro y fuerzas actuantes

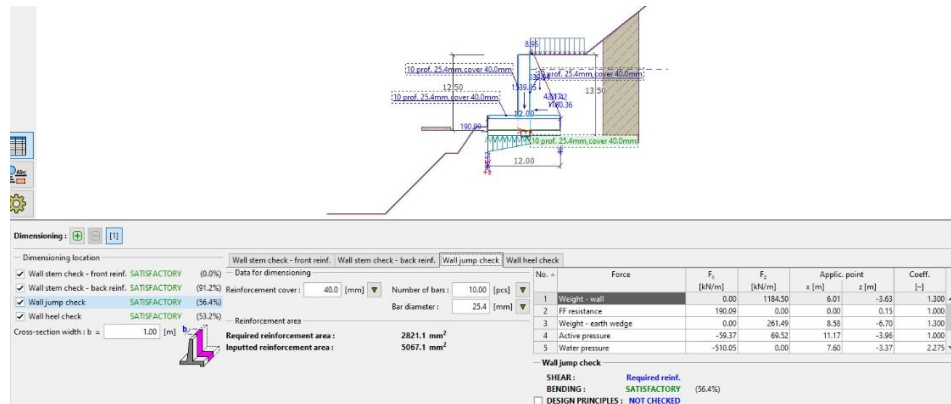
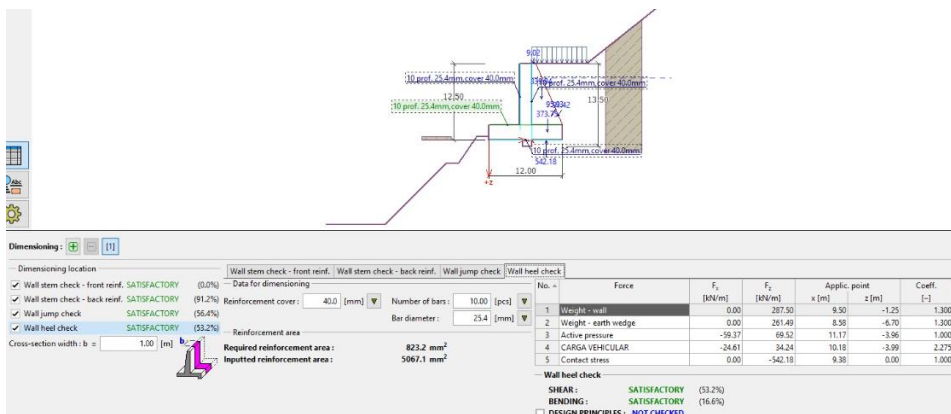


Figura 74.
Verificación del talón del muro y cargas aplicadas



2.4.3.13 Capacidad de carga

En el análisis de cimentación, no se calculó directamente la capacidad portante del suelo debido al uso de pilotes. Se utilizó la opción "In detail" para obtener la carga específica que se genera en los pilotes (ver figura 55), considerando una distribución rectangular de esfuerzos en la base. Este método se adapta mejor a la cimentación profunda del muro, proporcionando un análisis más preciso de la interacción suelo-estructura.

Figura 75.
Capacidad de carga

2.4.4 Geo 5 para modelación de anclajes de base

La siguiente metodología corresponde al diseño de los dos pilotes utilizados en las estructuras. Se detallarán los procedimientos y criterios técnicos empleados para garantizar la estabilidad y capacidad de carga de los pilotes, considerando las condiciones geotécnicas del terreno y las cargas a las que estarán sometidos.

2.4.4.1 Modelación de anclajes de base en conjunto con la modelación de los muros de contención

Para las estrategias que cuentan con el diseño de pilotes, dentro del aplicativo “CANTIELEVER WALL” de geo5, se puede hacer un diseño superficial de los mismos, para esto se siguió la siguiente metodología:

- Se activa la consideración de un anclaje de base.
- Se implementan los parámetros a los cuales está regido la creación del anclaje, en este caso, se hizo el diseño de los pilotes en el aplicativo “PILE” de geo5, para determinar su altura, anchura y el refuerzo de acero que lleva el anclaje.

Figura 76.
Creación de pilotes

<input checked="" type="checkbox"/> Consider base anchorage	
— Geometry	
Distance : x =	<input type="text" value="0.85"/> [m]
Depth : h =	<input type="text" value="8.00"/> [m]
Hole diam. : d =	<input type="text" value="0.50"/> [m]
Hole spacing : v =	<input type="text" value="1.00"/> [m]
Tensile strength :	<input type="text" value="input"/>
Tensile strength : R_t =	<input type="text" value="100.00"/> [kN]
Bar diam. : d_s =	<input type="text"/>
Ultimate strength : f_y =	<input type="text"/>
Ultimate strength : f_y =	<input type="text"/>
Safety factor : SF_t =	<input type="text"/>
Pull out resistance :	<input type="text" value="input"/>
Pull out resistance : T_p =	<input type="text" value="100.00"/> [kN/m]
Ultimate bond : a =	<input type="text"/>
Safety factor : SF_e =	<input type="text"/>

2.4.4.2 Parámetros de diseño para pilotes en “PILE”

Se emplea la metodología de factores de seguridad (ASD) con un análisis basado en el esfuerzo efectivo y el modelo elástico del subsuelo (método p-y) para la capacidad portante horizontal. Los factores de seguridad son 3.00 para pilotes a compresión y 2.00 para pilotes a tracción, mientras que en situaciones sísmicas se establece un valor de 1.50 para ambos tipos de pilotes, garantizando la estabilidad y la integridad estructural en ambos escenarios.

Figura 77.
Parámetros para pilotes

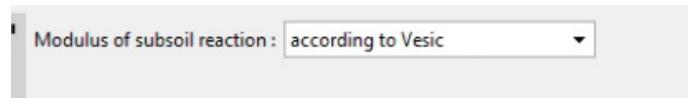
Edit current settings : Pile	
Materials and standards :	<input type="text" value="Pile"/>
Analysis for drained conditions :	<input type="text" value="Effective stress"/>
Analysis for undrained conditions :	<input type="text" value="Tomlinson"/>
Load settlement curve :	<input type="text" value="linear (Poulos)"/>
Horizontal bearing capacity :	<input type="text" value="Elastic subsoil (p-y method)"/>
Verification methodology :	<input type="text" value="Safety factors (ASD)"/>
Permanent design situation Transient design situation Accidental design situation Seismic design situation	
— Safety factors	
Safety factor for compressive pile :	SF_{cp} = <input type="text" value="3.00"/> [-]
Safety factor for tensile pile :	SF_{tp} = <input type="text" value="2.00"/> [-]

2.4.4.3 Modulo Kh

Se emplea el módulo de reacción del subsuelo (Kh) según Vesic, el cual es fundamental para evaluar la interacción suelo-pilote y la capacidad de carga horizontal.

Figura 78.

Configuración del módulo Kh



2.4.4.4 Parámetros del suelo

Se ingresan parámetros críticos del suelo, incluyendo un peso unitario de 18.38 kN/m³, coeficiente de Poisson de 0.30 y módulo elástico de 10.50 MPa. El suelo se caracteriza como arena limosa, con un coeficiente de capacidad portante de 0.67.

Figura 79.
Parámetros del suelo para la modelación de pilotes

Edit soil parameters

— Identification

Name: ARENA LIMOSA

— Basic data

Unit weight: $\gamma = 18.38$ [kN/m³]

Poisson's ratio: $\nu = 0.30$ [-]

— Effective stress method

Bearing capacity coefficient: $\beta_p = 0.67$ [-]

— Deformation characteristics

Settlement analysis: insert Eoed

Oedometric modulus: $E_{oed} = 10.50$ [MPa]

— Uplift pressure

Calc. mode of uplift: standard

Saturated unit weight: $\gamma_{sat} = 18.38$ [kN/m³]

— Determining modulus of subsoil reaction

Elastic modulus: $E = 10.50$ [MPa]

— Draw

Pattern category: GEO

Search:

Subcategory: Soils (1 - 16)

Pattern: 2 Sandy silt

Color:

Background: automatic

Saturation <10 - 90>: 50 [%]

Classify Clear OK Cancel

2.4.4.5 Fuerzas aplicadas

Las cargas transmitidas del muro al pilote se presentan en una tabla detallada que incluye seis casos de carga diferentes. Cada caso se analiza tanto para condiciones de diseño como de servicio. Las cargas axiales (N) varían entre 155.39 kN y 208.65 kN, mientras que los momentos en el eje y (My) oscilan entre 1.95 kNm y 16.39 kNm. No se registran momentos en el eje x ($M_x = 0.00$ kNm) ni fuerzas horizontales en x ($H_x = 0.00$ kN).

Las fuerzas horizontales en y (H_y) van desde -68.29 kN hasta 0.27 kN. Esta información es crucial para el dimensionamiento y verificación estructural del pilote bajo las diversas condiciones de carga impuestas por el muro de contención.

Figura 80.
Cargas de servicio y designadas

No.	Load		Name	N [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	H _x [kN]	H _y [kN]	Type
	new	edit							
1	Yes		1	208.65	0.00	1.95	0.00	-68.29	Design
2	Yes		1	208.65	0.00	1.95	0.00	-68.29	Service
3	Yes		2	208.65	0.00	2.45	0.00	-65.95	Design
4	Yes		2	208.65	0.00	2.45	0.00	-65.95	Service
5	Yes		3	202.16	0.00	5.20	0.00	-66.22	Design
6	Yes		3	202.16	0.00	5.20	0.00	-66.22	Service
7	Yes		4	202.16	0.00	5.20	0.00	-66.22	Design
8	Yes		4	202.16	0.00	5.20	0.00	-66.22	Service
9	Yes		5	200.16	0.00	6.04	0.00	-66.30	Design
10	Yes		5	200.16	0.00	6.04	0.00	-66.30	Service
11	Yes		6	155.39	0.00	16.39	0.00	0.27	Design
12	Yes		6	155.39	0.00	16.39	0.00	0.27	Service

2.4.4.6 Dimensiones del pilote

Se especifica un pilote circular de concreto con un diámetro (d) de 0.50 m y una longitud (l) de 10.00 m. La tecnología empleada es la de pilotes perforados (bored piles). El desplazamiento de la cabeza del pilote (pile head offset) y la profundidad del nivel de terreno terminado (depth of finished grade) se establecen ambos en 0.00 m, indicando que el pilote comienza a nivel del suelo.

Figura 81.
Dimensiones del pilote

— Basic dimensions —

Cross section of pile :

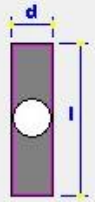
Pile diameter : d = [m]

Pile length : l = [m]

Material of pile :

— Technology —

Technology :



— Location —

Pile head offset : h = [m]

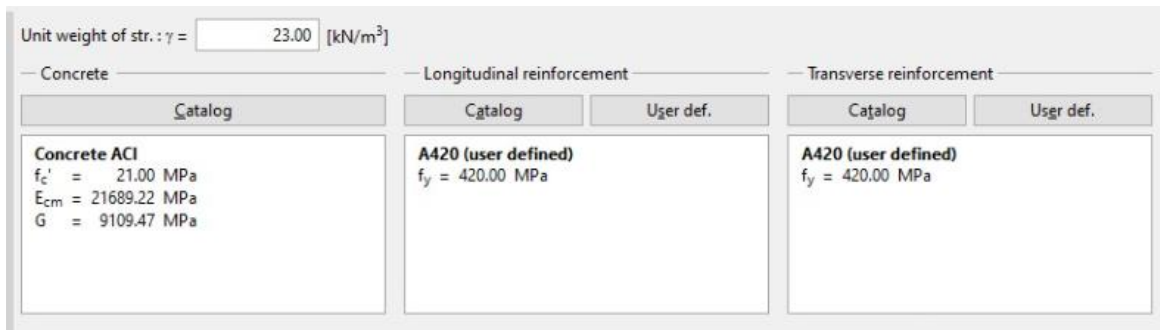
Depth of finished grade : h_z = [m]

2.4.4.7 Materiales implementados

Tabla 3.
Materiales empleados

ITEM	VALOR
Peso Unitario	23.00 kN/m ³
Resistencia a la compresión (f'c)	21.00 MPa
Módulo de elasticidad (E _{cm})	21689.22 MPa
Módulo de corte (G)	9109.47 MPa
Límite de fluencia (f _y)	420.00 MPa

Figura 82.
Material para pilotes ingresados en Geo5



2.4.4.8 Subsuelo

Las condiciones del subsuelo para el diseño del pilote son: nivel freático a 2,40 m de profundidad y suelo compresible.

Figura 83.
Subsuelo del pilote

Ground water
 Depth from ground surface : GWT = [m]

Incompressible subsoil
 Depth from ground surface : IS = [m]

2.4.4.9 Verificación

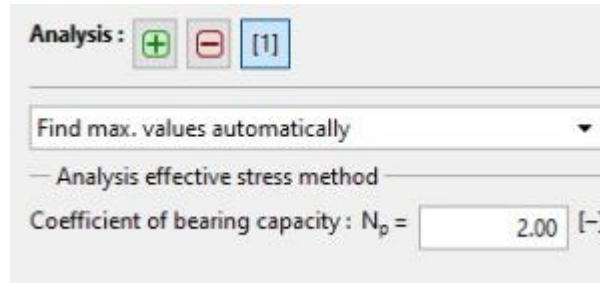
Tabla 4.
Verificación

ITEM	VALOR
Capacidad portante	705,58 kN
Fricción lateral	663,24 kN
Carga en punta	42,33 kN
Factor de seguridad	3,38
Factor de seguridad requerido	3,00

2.4.4.9.1 Capacidad portante

El análisis de capacidad portante del pilote se realiza mediante el método de esfuerzos efectivos, con un coeficiente de capacidad portante (Nb) de 2.00. El software está configurado para encontrar automáticamente los valores máximos, lo que optimiza el cálculo considerando las condiciones del suelo y las cargas aplicadas.

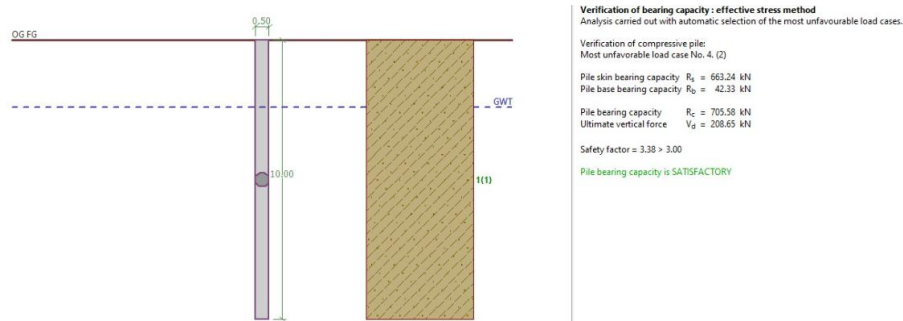
Figura 84.
Capacidad portante



2.4.4.9.2 Verificación de la capacidad portante

La capacidad portante total del pilote es 705,58 kN, compuesta por 663,24 kN de fricción lateral y 42,33 kN de carga en punta. Con una carga vertical última de 208,65 kN, el factor de seguridad resulta 3,38, superando el requerido de 3,00. Por lo tanto, la capacidad portante del pilote es satisfactoria.

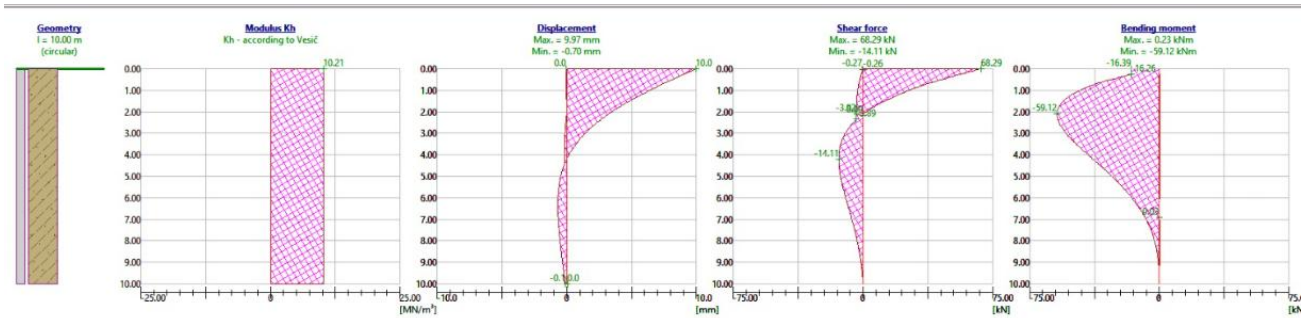
Figura 85.
Verificación de la capacidad portante del pilote



2.4.4.10 Análisis general del pilote

Los resultados de la verificación son satisfactorios para cortante (28.6% de capacidad utilizada), flexión y compresión (31.2%), y ratio de refuerzo (68.9%). El desplazamiento máximo es de 10.0 mm, la fuerza cortante máxima de 68.29 kN, y el momento máximo de 59.12 kNm. El análisis considera la interacción suelo-estructura y confirma que el diseño del pilote es adecuado para las cargas aplicadas.

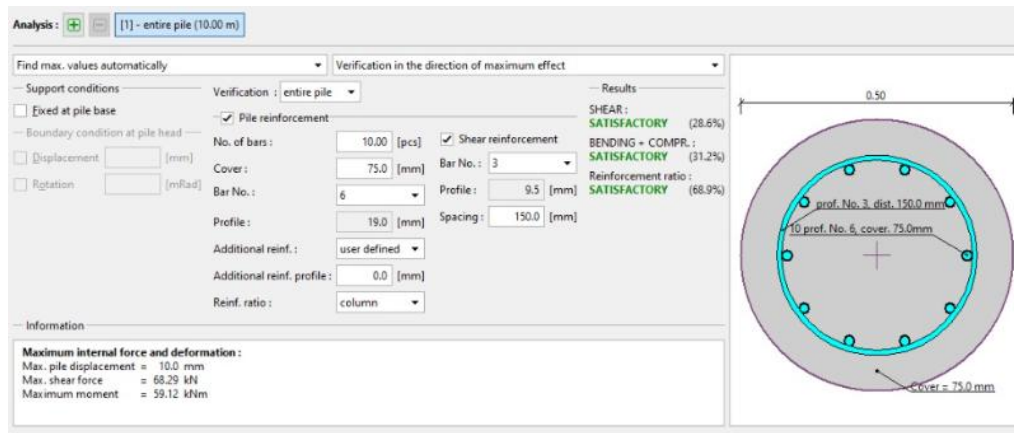
Figura 86.
Análisis del pilote



2.4.4.11 Análisis de acero para pilotes

El pilote está reforzado con 10 barras longitudinales y estribos circulares. Los gráficos (ver figura 61) indican la distribución del módulo de reacción del suelo, desplazamiento, fuerza cortante y momento flector a lo largo del pilote

Figura 87.
Verificación de cuantía de aceros para pilotes



2.5 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para cada objetivo específico, retomando la metodología utilizada para alcanzarlos.

2.5.1 Resultados objetivo 1

El primer objetivo específico corresponde a: “Realizar el levantamiento topográfico mediante tecnología LiDAR”. Se presentan los resultados obtenidos siguiendo la metodología correspondiente y se concluye con un plano del levantamiento topográfico.

2.5.1.1 Resultados de procesamiento de datos LiDAR

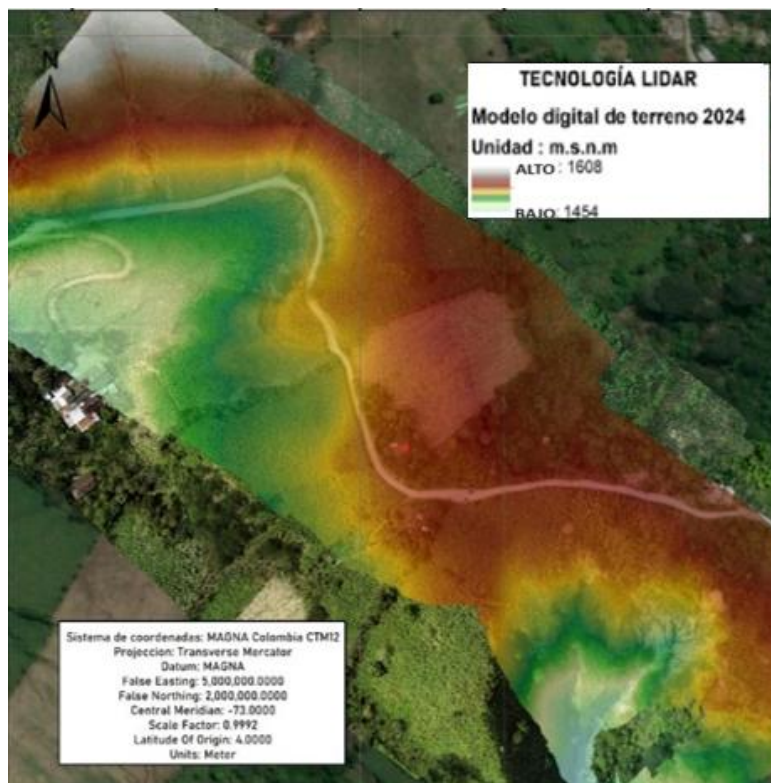
Luego de realizar la metodología correspondiente, y procesar los datos del levantamiento topográfico, se obtienen los siguientes resultados:

2.5.1.1.1 Modelo digital de terreno

En la figura 35 se obtiene un modelo digital de terreno (MDT) con datos LiDAR. Una representación tridimensional precisa de la superficie terrestre del sitio a partir del levantamiento y procesamiento mediante tecnología LiDAR, proporcionando una resolución y precisión muy alta en la captura de la elevación del terreno. Este modelo es muy importante en el proyecto, ya que es el que permite realizar el análisis multitemporal.

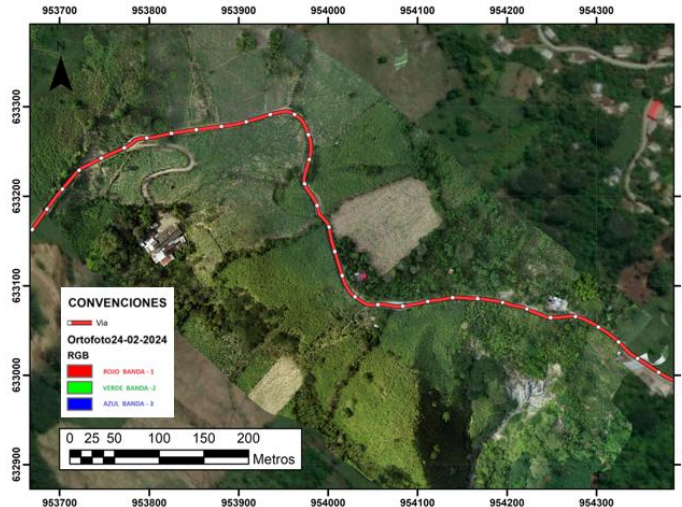
Figura 88.

Modelo digital de terreno con topografía LiDAR



Se realiza el trazado de la vía en el plano con el fin de identificar más fácilmente la ruta de la carretera que pasa por las veredas de Roma y Chavez y que conecta los municipios de Sandoná y Ancuya; y con base al trazado se realizan e identifican las curvas de nivel. (figura 36)

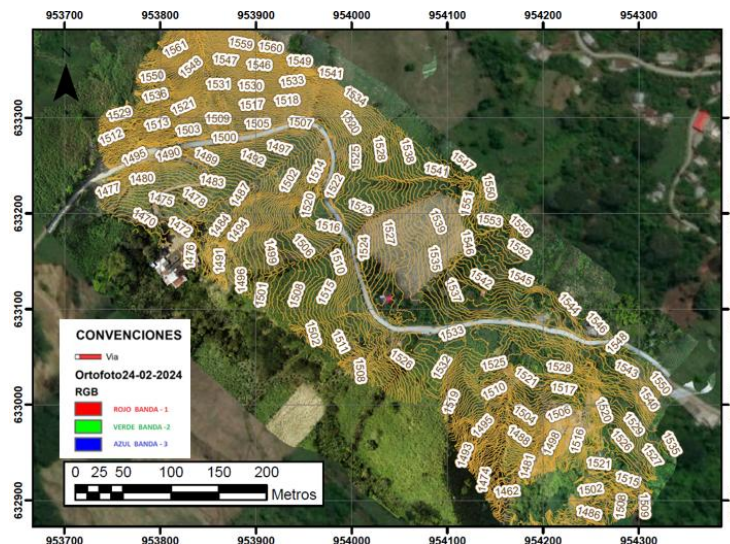
Figura 89.
Trazado de la vía



2.5.1.1.2 Curvas de nivel

También es necesario realizar las curvas de nivel con datos LiDAR, lo cual implica procesar los datos de elevación capturados por el sistema LiDAR para crear líneas que conectan puntos de igual altitud en un mapa. Este proceso es esencial para la representación topográfica del terreno, ya que, proporcionan una representación detallada y precisa del relieve del terreno. (figura 37)

Figura 90.
Curvas de nivel



2.5.1.1.3 Ortofoto

La ortofoto es una imagen aérea que fue corregida geoméricamente para eliminar distorsiones causadas por la topografía y la inclinación del sensor de la cámara, es decir, corregir las imágenes aéreas utilizando el modelo digital del terreno (MDT) para ajustar cada píxel de la imagen, eliminando las distorsiones y asegurando que las distancias medidas en la ortofoto sean precisas y consistentes, de modo que se combinan la precisión topográfica con la riqueza visual de las imágenes aéreas. (figura 38)

Figura 91.
Ortofoto



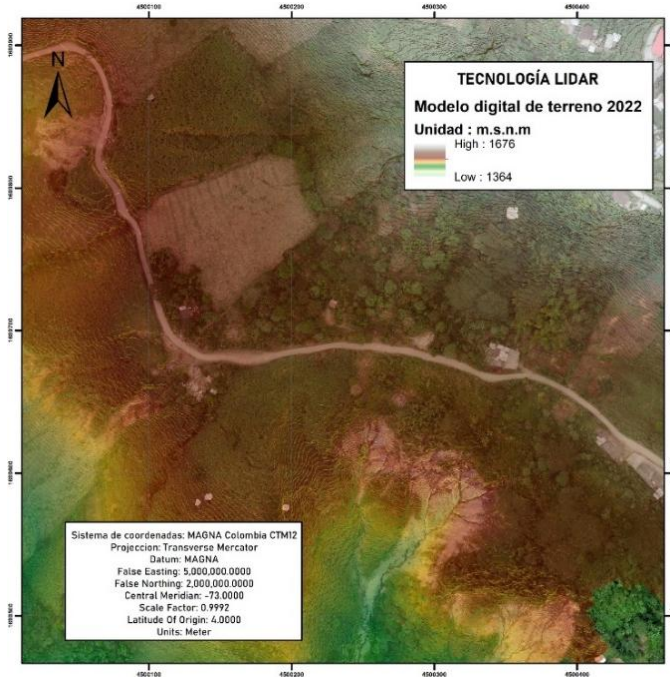
2.5.2 Resultados objetivo 2

El segundo objetivo específico corresponde a: “Comparar los modelos digitales del terreno (MDT) obtenidos del sensor LiDAR con resultados previos mediante un análisis multitemporal haciendo uso de Civil 3D.”. Se presentan los resultados obtenidos siguiendo la metodología correspondiente, obteniendo gráficas que permiten realizar un análisis multitemporal de movimientos entre la topografía del año 2022 y el presente año (2024). Se adjuntan imágenes de los resultados y para mejor evidencia de estos revisar anexos.

2.5.2.1 Comparación multitemporal

Se presenta el modelo digital del terreno (MDT) del levantamiento topográfico realizado en el año 2022 y se procede a realizar la comparación con el MDT de la actualidad (Ver figura. 36)

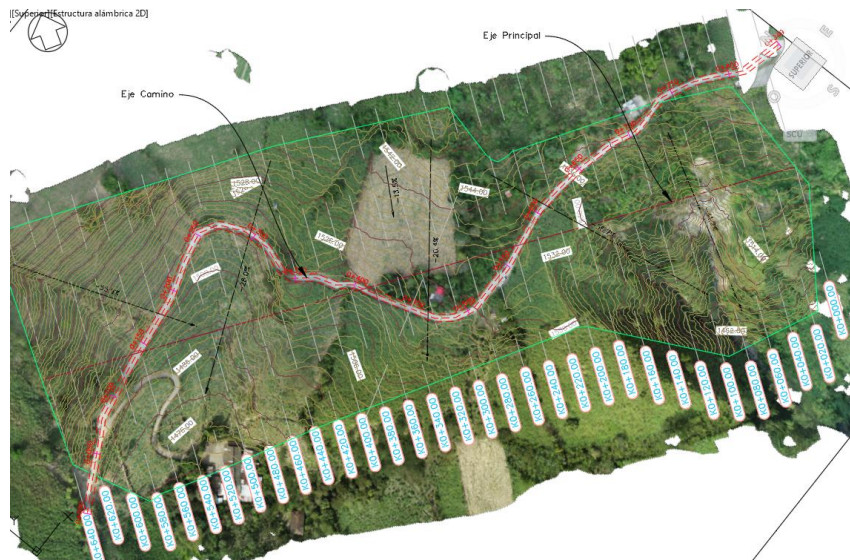
Figura 92.
Modelo digital del terreno (MDT) año 2022



Fuente: Alcandía de Sandoná, 2022.

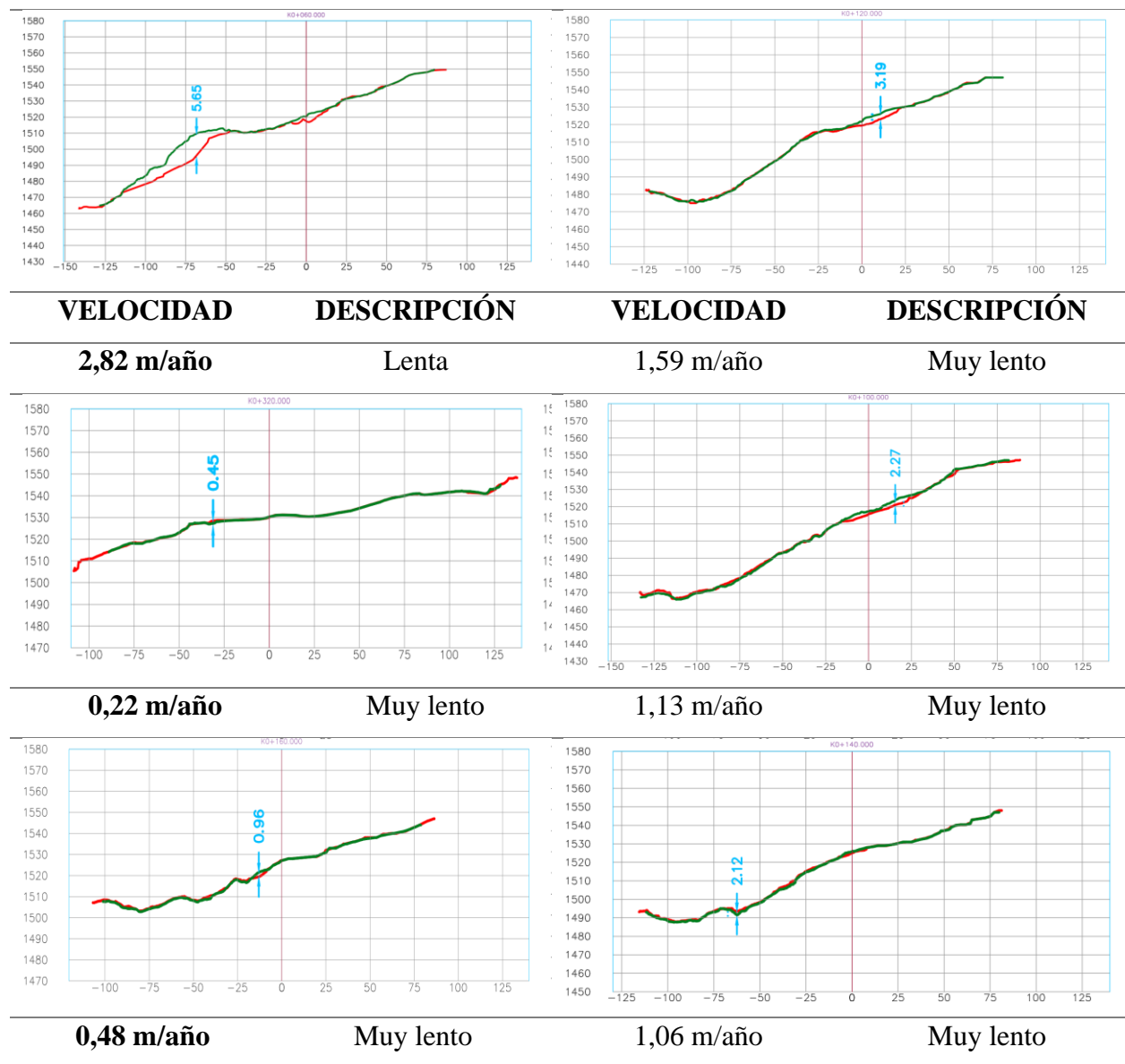
Siguiendo la metodología correspondiente, se obtuvo la Figura 40 en donde se observa la diferencia de curvas de nivel basándose en las abscisas del eje de la vía y el eje principal.

Figura 93.
Curvas de nivel 0.5m - 1.0m



La diferencia existente entre las dos tomas de resultados (2022 y 2024) es de aproximadamente dos años, por lo que a las alturas obtenidas en los dos estudios se las divide entre 2 para así poder clasificarlo en la tabla de Varnes (Figura 34) para calcular el desplazamiento que se presenta cada año, teniendo así, las siguientes gráficas, con el color verde que representa el MDT del año 2022 y el color rojo para el MDT actual.

Tabla 5.
Comparativa de secciones transversales



Teniendo en cuenta los resultados de la comparación, se puede decir que, según los criterios de Varnes (ver figura 31) se tuvo un movimiento que no es detectable a simple vista, puesto que, es un movimiento muy lento, pero, gracias al sistema LiDAR y a la precisión que tiene, es posible visualizar el movimiento en masa generado. (para la visualización del análisis de cada de una de las gráficas ver anexos 1)

Figura 94.

Comparativa del eje de la vía en los años correspondientes al análisis multitemporal

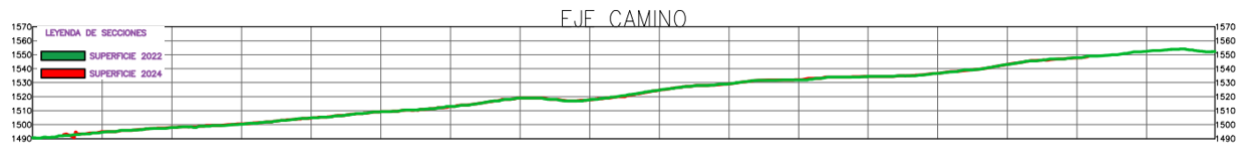
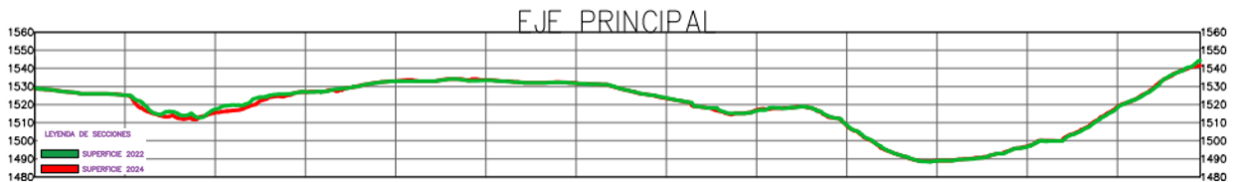


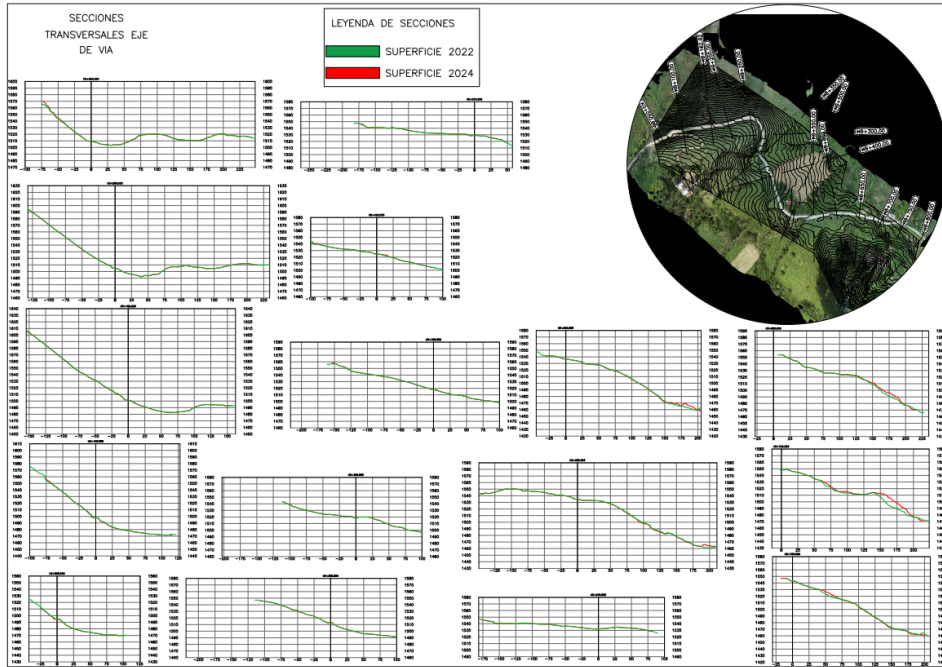
Figura 95.

Comparativa del eje principal en los años correspondientes al análisis multitemporal



A continuación, se analizó detalladamente las secciones transversales del eje de la vía. (ver anexo 1)

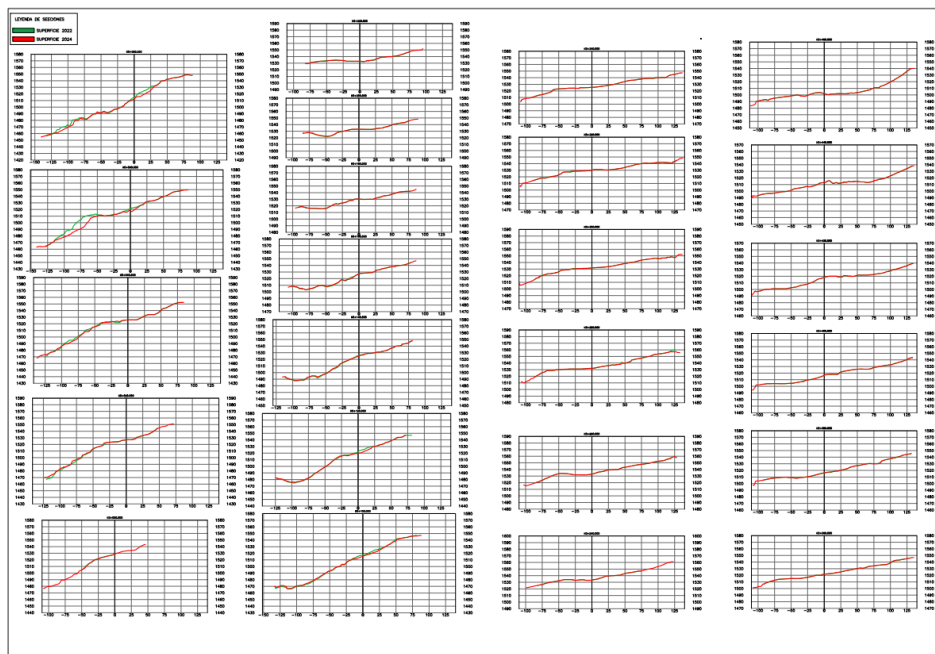
Figura 96.
Secciones transversales del eje de la vía



Posteriormente, se examinó minuciosamente las secciones transversales generales. (ver anexo

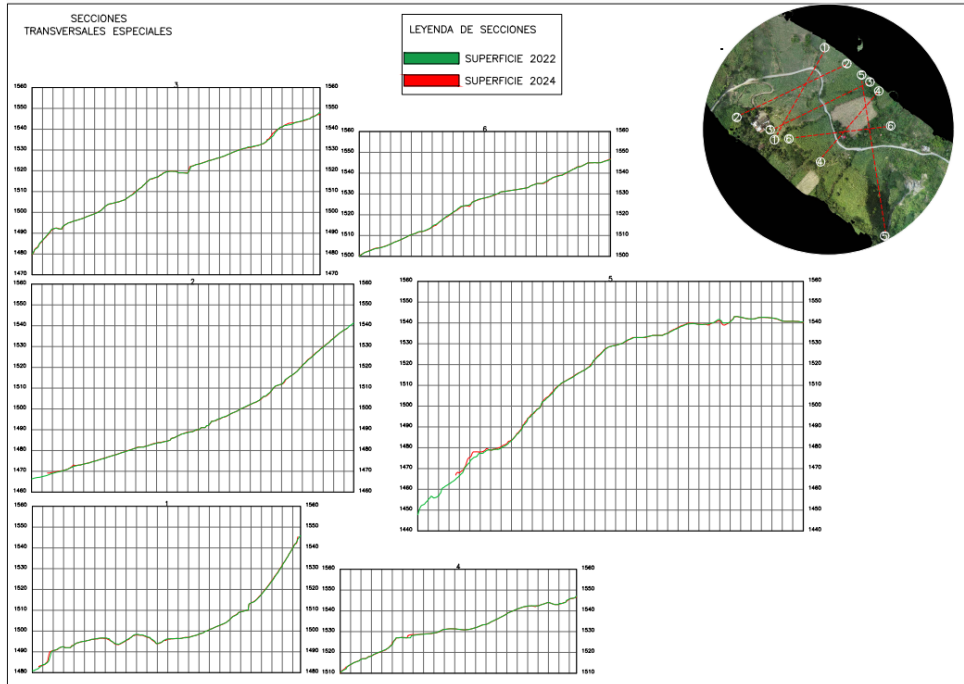
1)

Figura 97.
Secciones transversales generales



Finalmente, se observó tendidamente las secciones transversales especiales. (ver anexo 1)

Figura 98.
Secciones transversales especiales



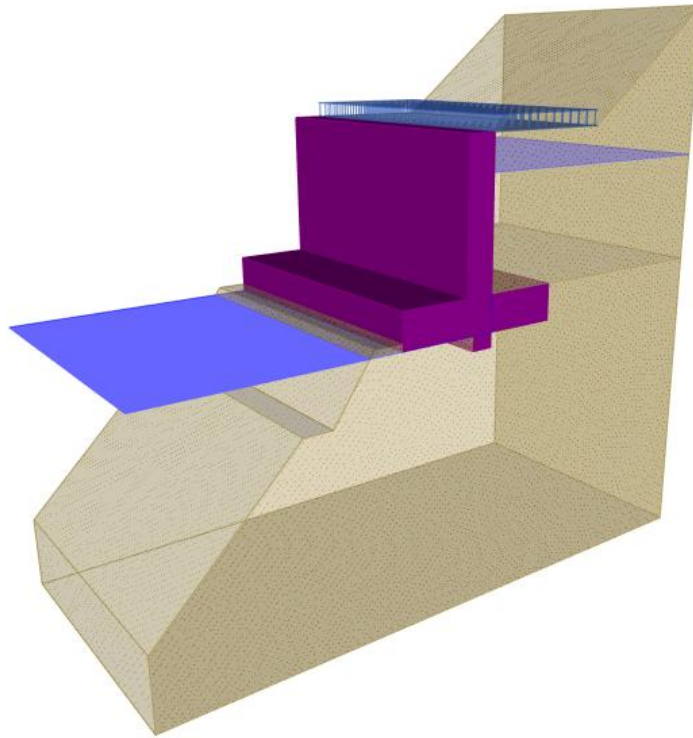
2.5.3 Resultados objetivo 3

La estabilización de taludes es un aspecto crítico en la ingeniería geotécnica y civil, especialmente en áreas donde la topografía y las condiciones geológicas presentan desafíos para la seguridad de la población y la infraestructura. Este estudio se ha enfocado en desarrollar estrategias efectivas de estabilización utilizando el software Geo5, una herramienta avanzada para el análisis y diseño de estructuras geotécnicas.

El objetivo principal ha sido proponer soluciones que no solo aborden los problemas técnicos de estabilidad, sino que también garanticen una mayor seguridad para los habitantes e infraestructuras de la zona. Para lograr esto, hemos desarrollado tres estrategias distintas, cada una adaptada a diferentes escenarios y condiciones del terreno.

A continuación, presentaremos estas tres estrategias de estabilización de taludes:

Figura 100.
Estrategia de estabilización de taludes No. 1 - 3D



2.5.3.2 Estrategia de estabilización de taludes No. 2

En la segunda estrategia, el diseño presentado en la figura muestra una estructura con muro en voladizo. Esta configuración es ampliamente utilizada en ingeniería geotécnica debido a su eficiencia estructural y económica. La geometría que usa el pilote permite una distribución óptima de las fuerzas, utilizando el peso del suelo sobre la base para contrarrestar las presiones laterales del terreno retenido.

Esta optimización no solo asegura la integridad estructural, sino que también minimiza el uso de materiales, lo que contribuye a la sostenibilidad del proyecto. Además, la forma esbelta del muro, con una reducción gradual del espesor hacia la parte superior, demuestra una consideración por la eficiencia de materiales y la estética visual, aspectos cada vez más importantes en los proyectos de ingeniería modernos.

Figura 101.

Estrategia de estabilización de taludes No. 2 – 2D

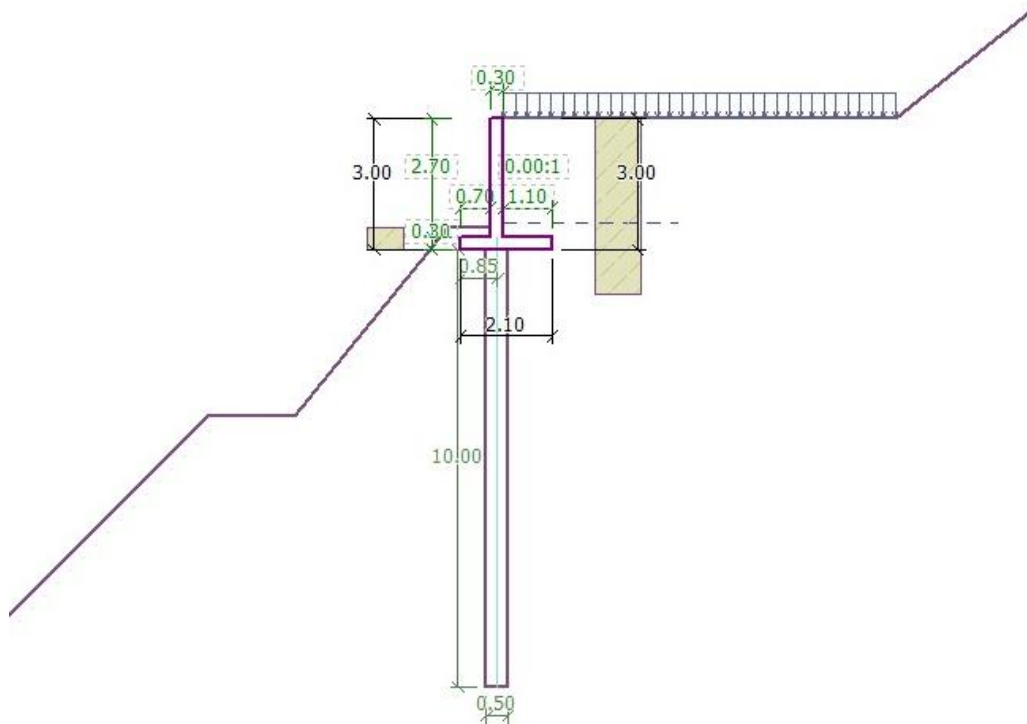


Figura 102.

Estrategia de estabilización de taludes No. 2 – 3D

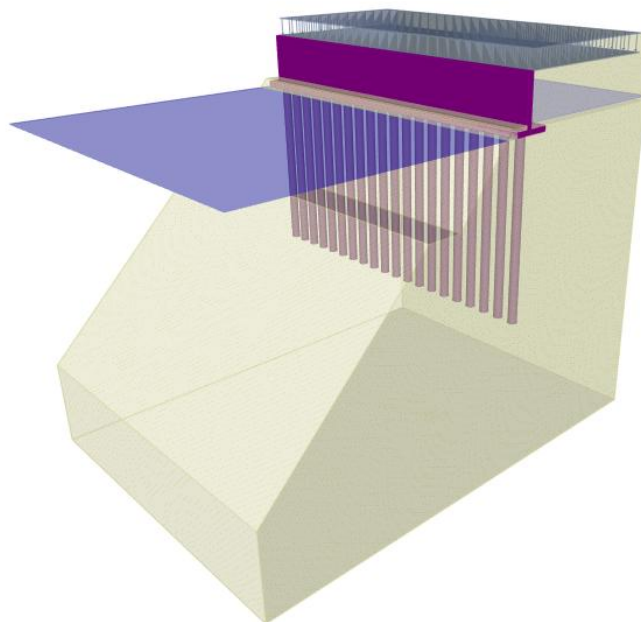


Figura 103.
Pilote utilizado en la estrategia No.2 – 2D

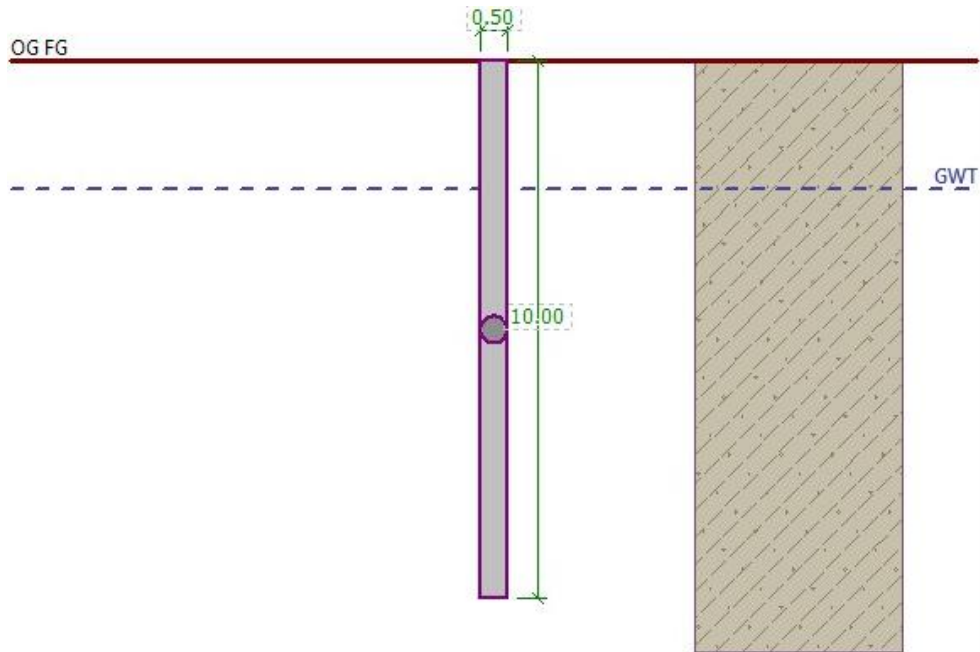


Figura 104.
Pilote utilizado en la estrategia No.2 – 3D



2.5.3.3 Estrategia de estabilización de taludes No. 3

En la última estrategia propuesta, la figura presenta un diseño avanzado de muro de contención en voladizo con pilote que incorpora elementos estructurales innovadores para maximizar la estabilidad y eficiencia. Con una altura principal de 4.45 metros, la estructura utiliza un contrafuerte diagonal integrado, una característica que distingue este diseño de los muros de contención convencionales. Esta configuración no solo proporciona un soporte adicional contra las presiones laterales del suelo, sino que también optimiza la distribución de fuerzas a lo largo de la estructura, permitiendo potencialmente una reducción en el uso de materiales sin comprometer la integridad estructural.

La geometría compleja de la estructura, con sus múltiples secciones y el contrafuerte diagonal, refleja un enfoque de diseño altamente optimizado. El contrafuerte, que se extiende en un ángulo específico desde la base, no solo proporciona soporte estructural adicional, sino que también ayuda a distribuir las presiones del suelo sobre un área mayor. Esta característica es particularmente valiosa en situaciones donde las condiciones del suelo son desafiantes o donde existen limitaciones de espacio. Además, la base extendida y la configuración escalonada de la estructura sugieren una consideración cuidadosa de la estabilidad global y la resistencia al deslizamiento.

Figura 105.

Estrategia de estabilización de taludes No. 3 – 2D

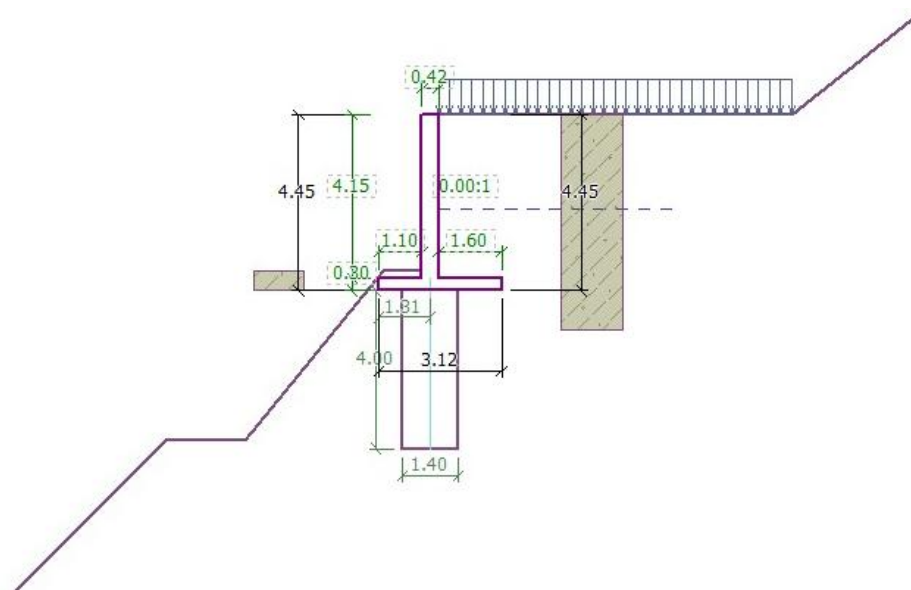


Figura 106.
Estrategia de estabilización de taludes No. 3 – 3D

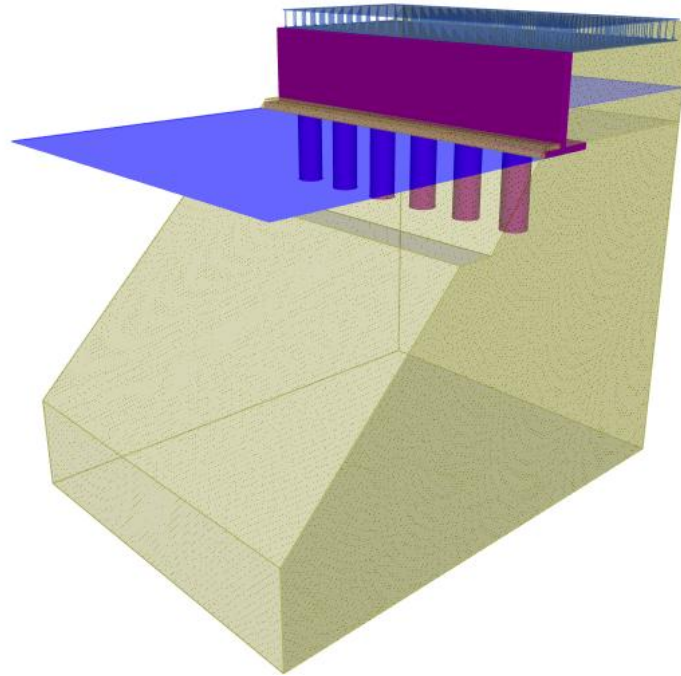


Figura 107.
Pilote utilizado en la estrategia No.3 – 2D

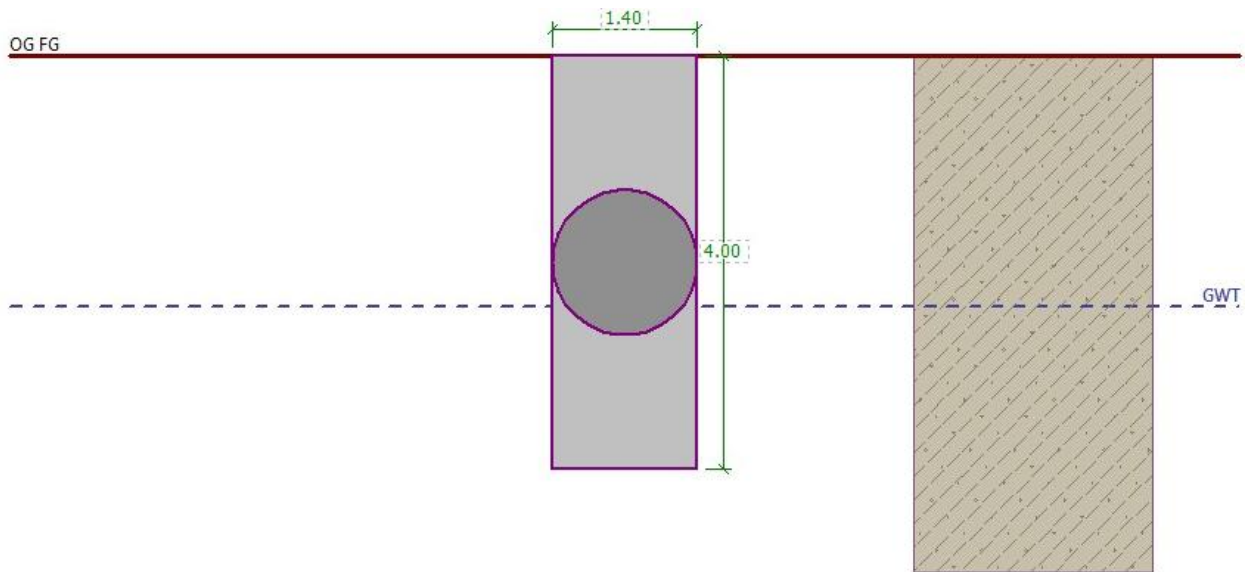
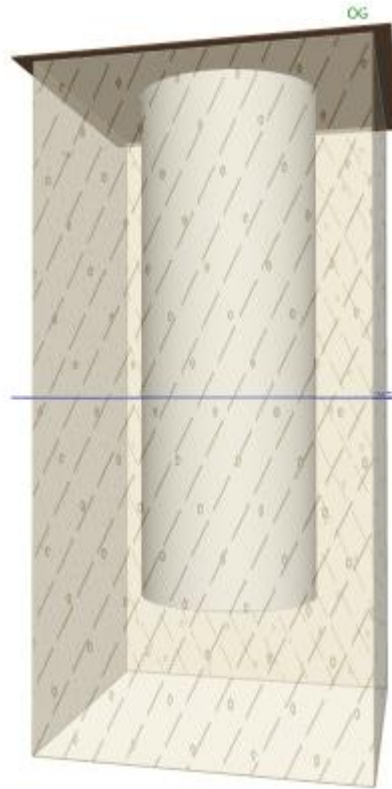


Figura 108.
Pilote utilizado en la estrategia No.3 – 3D



2.5.4 Características principales

2.5.4.1 Estrategia No.1

El suelo en la estrategia No.1 presenta características mecánicas moderadas, con un ángulo de fricción de 21.28° y una cohesión de 37.36 kPa, lo que indica un material cohesivo-friccionante con capacidad portante adecuada. Estas propiedades son típicas de suelos tipo arcilla arenosa o limo arcilloso de consistencia firme, lo que requiere consideraciones específicas en el diseño y construcción. La cohesión significativa proporciona una resistencia adicional importante, especialmente en condiciones no saturadas, aunque debe considerarse la posibilidad de reducción de esta propiedad en condiciones de saturación. La combinación de estos parámetros geotécnicos sugiere un comportamiento estable bajo cargas estáticas, siempre que se mantengan las condiciones de humedad controladas y se implementen sistemas de drenaje adecuados. La

capacidad del suelo para distribuir las cargas aplicadas se ve favorecida por su composición mixta, permitiendo una transferencia de esfuerzos más uniforme a través de su matriz.

El comportamiento previsto de la estructura, basado en el análisis integral de todos los factores, indica una respuesta satisfactoria ante las cargas de diseño. La configuración geométrica favorece una distribución uniforme de esfuerzos, minimizando el riesgo de asentamientos diferenciales. La interacción suelo-estructura se beneficia de la base ancha y la geometría escalonada, que proporcionan una transición suave de cargas al terreno de fundación. Los elementos estructurales están dimensionados adecuadamente para resistir tanto las cargas verticales como las presiones laterales del suelo. El sistema de drenaje propuesto ayudará a mantener condiciones hidrogeológicas estables, previniendo la degradación de la resistencia del suelo por saturación. Se espera que las deformaciones se mantengan dentro de límites aceptables, tanto a corto como a largo plazo, siempre que se mantengan las condiciones de diseño y se implementen las medidas de control y monitoreo recomendadas.

La estructura presenta una geometría favorable con una base de 12 metros de ancho, lo que proporciona una distribución adecuada de cargas y aumenta significativamente la estabilidad global. El diseño incorpora elementos que contribuyen a su rigidez y resistencia, como la configuración escalonada que ayuda a distribuir las cargas de manera más uniforme. La dimensión significativa de la base no solo mejora la resistencia al deslizamiento, sino que también reduce las presiones de contacto sobre el suelo de fundación. Los elementos estructurales están dispuestos de manera que optimizan la transferencia de cargas, minimizando las concentraciones de esfuerzos y reduciendo el riesgo de deformaciones diferenciales. La geometría escalonada también contribuye a una mejor adaptación a las condiciones topográficas y facilita el manejo de las presiones laterales del suelo.

Aunque contar con dimensiones significativas puede beneficiar la distribución de cargas y la estabilidad general, un muro de contención excesivamente grande también presenta algunos desafíos potenciales que deben considerarse cuidadosamente; en el caso de las presiones laterales, un muro más alto estará sujeto a mayores presiones de tierra laterales, lo que requiere un diseño estructural más vigoroso para resistirlas; en el caso de la estabilidad y factores de seguridad este tipo de muros exigen un análisis más riguroso de la estabilidad global contra deslizamiento, volcamiento y capacidad portante, asegurando que se cumplan los factores de seguridad adecuados

y por otro lado, el potencial de asentamientos diferenciales más grandes aumenta con anchos de cimentación muy amplios, lo que requiere un control estricto de las deformaciones.

El análisis de presiones laterales revela una situación favorable con un coeficiente de presión activa (K_a) de 0.466 y un coeficiente de presión pasiva (K_p) de 2.147. Esta diferencia significativa entre coeficientes indica que la resistencia pasiva del suelo supera ampliamente las fuerzas activas desestabilizadoras, proporcionando un margen de seguridad adecuado. La distribución de presiones muestra un incremento lineal con la profundidad, típico en suelos homogéneos, con valores máximos en la base de la estructura. La presencia de cohesión contribuye a reducir las presiones laterales netas, especialmente en la zona superior del perfil. El diseño escalonado de la estructura ayuda a distribuir estas presiones de manera más uniforme, reduciendo las concentraciones de esfuerzos en puntos específicos.

El análisis de capacidad portante del muro de contención, con una altura de 13.50 metros y base de 12.00 metros, revela un comportamiento estructural satisfactorio y seguro. Los cálculos demuestran una capacidad portante última de 5,484.4 kPa, que al aplicar un factor de seguridad conservador de 3.0, resulta en una capacidad portante admisible de 1,828.1 kPa, significativamente superior a las presiones máximas generadas por la estructura (391.9 kPa). Esta considerable diferencia proporciona un factor de seguridad real de 4.67, lo que asegura un excelente desempeño contra fallas por capacidad de carga. La distribución de presiones en la base muestra un patrón trapezoidal favorable, con valores que oscilan entre 130.6 kPa y 391.9 kPa, reflejando una transmisión de cargas equilibrada al suelo de fundación. Este comportamiento es resultado de la adecuada geometría del muro, que incluye una base robusta de 5.00 metros de espesor y una distribución proporcional entre el pie y el talón (ambos de 5.00 metros), permitiendo una óptima distribución de las cargas provenientes tanto del peso propio de la estructura (1,920 kN/m) como del empuje lateral del suelo retenido. La profundidad de desplante de 5.00 metros contribuye significativamente a la estabilidad global, aprovechando eficientemente la resistencia del suelo de fundación y minimizando el riesgo de asentamientos diferenciales.

Los factores de seguridad calculados demuestran un comportamiento satisfactorio en todos los aspectos críticos de diseño. Para la capacidad portante, el factor de seguridad supera el mínimo requerido de 3.0, proporcionando un margen adecuado contra fallas por capacidad de carga. En cuanto al deslizamiento, el factor de seguridad excede el valor mínimo de 1.5, gracias a la combinación favorable de la fricción basal y la cohesión. La estabilidad al volcamiento también

muestra un factor de seguridad superior a 2.0, beneficiándose de la geometría de la estructura y su base ancha. Los factores de seguridad globales para la estabilidad del conjunto suelo-estructura se mantienen por encima de 1.5 en condiciones estáticas y 1.1 en condiciones sísmicas, cumpliendo con los requisitos normativos.

Para garantizar la estabilidad y longevidad de esta estrategia, se implementará un sistema de control de agua y drenaje eficiente que mitigará los efectos de la presión hidrostática y la acumulación de humedad. Se colocará un drenaje francés detrás del muro, compuesto por tuberías perforadas rodeadas de grava y protegidas con geotextil, permitiendo la captura y redirección del agua acumulada. Además, se aplicará un revestimiento impermeabilizante en la cara expuesta al terreno para evitar la infiltración de humedad. El terreno circundante será inclinado para asegurar un adecuado escurrimiento superficial y, en combinación con canaletas colectoras, protegerá la estructura de la acumulación de aguas pluviales. Estas medidas aseguran un óptimo manejo del agua, reduciendo riesgos de socavamiento o desestabilización del muro.

2.5.4.2 Estrategia No.2

El suelo presente en el sitio exhibe características geotécnicas moderadamente favorables, con un ángulo de fricción interna (ϕ) de 21.28° y una cohesión (c) de 37.36 kPa. Estos parámetros indican un suelo cohesivo-friccionante con capacidad moderada para resistir esfuerzos cortantes. La presencia de cohesión significativa contribuye sustancialmente a la estabilidad global de la estructura, especialmente en la resistencia al deslizamiento y en la capacidad portante del suelo de fundación.

La estructura presenta un comportamiento notablemente satisfactorio en términos de estabilidad global. El análisis de los factores de seguridad revela valores significativamente superiores a los mínimos requeridos por la normativa nacional. El factor de seguridad al deslizamiento (FSD) de 4.52 supera ampliamente el valor mínimo recomendado de 1.5, lo cual se atribuye principalmente a la considerable contribución de la cohesión del suelo y a la geometría optimizada de la estructura

El análisis de presiones laterales, demuestra un escenario favorable. Los coeficientes de presión activa ($K_a = 0.47$) y pasiva ($K_p = 2.13$) indican una relación adecuada entre las fuerzas desestabilizadoras y estabilizadoras. La presencia de un empuje pasivo significativo ($P_p = 313.6$ kN/m) contribuye sustancialmente a la estabilidad global del sistema, contrarrestando efectivamente las fuerzas activas que tienden a desestabilizar la estructura.

La evaluación de la capacidad portante del suelo revela resultados altamente satisfactorios. La capacidad portante última calculada de 1,250 kPa, que al aplicar un factor de seguridad de 3.0 el cual nos lo da la norma NSR-10, resulta en una capacidad portante admisible de 417 kPa, esto demuestra que el suelo de fundación es capaz de soportar adecuadamente las cargas transmitidas por la estructura. La base extendida juega un papel crucial en la distribución eficiente de las cargas, reduciendo significativamente las presiones de contacto y minimizando el riesgo de fallas por capacidad portante.

la capacidad portante demuestra la viabilidad técnica del proyecto desde la perspectiva geotécnica. La combinación de parámetros de resistencia favorables del suelo, una geometría optimizada de la base y un factor de seguridad adecuado resulta en una solución técnicamente robusta y segura. Los valores calculados de capacidad portante, junto con las consideraciones de distribución de cargas y control de asentamientos, proporcionan un fundamento sólido para proceder con la construcción, siempre que se implementen las medidas de control y monitoreo recomendadas

El factor de seguridad al volcamiento (FSV) de 3.8 supera significativamente el valor mínimo requerido de 2.0, lo cual indica una excelente resistencia de la estructura frente a momentos desestabilizadores. Este favorable comportamiento se debe principalmente a la geometría optimizada de la estructura y a la contribución efectiva del peso propio y del suelo sobre el talón de la base.

El diseño del control de agua y drenaje para esta estrategia busca prevenir la acumulación de presión hidrostática y el deterioro estructural mediante un enfoque integral. Se instalará un sistema de drenaje vertical complementado con una línea de drenaje en la base, ambos rodeados de material granular y protegidos con geotextil para asegurar la correcta filtración del agua. Se aplicará una barrera impermeabilizante en el lado del muro en contacto con el terreno, maximizando la protección contra la humedad. La inclinación del terreno y la instalación de canales para captar aguas superficiales garantizarán un manejo eficiente del flujo pluvial, asegurando así la estabilidad y durabilidad de la estructura.

2.5.4.3 Estrategia No.3

El suelo presente en el sitio muestra características moderadas de resistencia, con un ángulo de fricción de 21.28° que indica un suelo cohesivo-friccionante. La cohesión de 37.36 kPa sugiere la

presencia de un suelo arcilloso o limo-arcilloso con capacidad media para resistir esfuerzos cortantes. Estas propiedades son fundamentales para la estabilidad global del sistema, ya que influyen directamente en la magnitud de las presiones laterales y en la capacidad de soporte. La profundidad de cimentación de 0.3 metros, aunque relativamente superficial, puede ser adecuada considerando la cohesión presente, siempre que se garantice que esta profundidad esté por debajo de la zona de influencia de cambios volumétricos estacionales.

La estructura presenta una configuración geométrica típica de muros de contención en voladizo, con una altura total de 4.45 metros. La pantalla vertical actúa como elemento principal de retención, mientras que la base proporciona estabilidad contra el volcamiento y deslizamiento. El espesor variable de la pantalla, que se incrementa hacia la base, optimiza la distribución de esfuerzos internos y reduce el consumo de materiales. La geometría del talón (parte posterior de la base) aprovecha el peso del suelo sobre él para mejorar la estabilidad global, mientras que el pie (parte frontal) contribuye a la resistencia pasiva y mejora la estabilidad al volcamiento.

Las presiones laterales calculadas reflejan una distribución triangular característica, con valores máximos en la base del muro. La presión activa en la base de 37.33 kPa representa el empuje del suelo retenido, considerando tanto la componente friccional como la cohesiva. Por otro lado, la presión pasiva de 259.87 kPa en la base demuestra la significativa resistencia disponible frente al deslizamiento. La diferencia entre ambas presiones indica un margen considerable de seguridad contra el deslizamiento lateral. Es importante notar que estas presiones han sido calculadas considerando condiciones drenadas y sin nivel freático, por lo que cualquier presencia de agua requeriría una reevaluación.

La capacidad portante admisible calculada de 195.6 kPa proporciona un soporte adecuado para las cargas transmitidas por la estructura. Este valor considera un factor de seguridad conservador de 3.0, que contempla las incertidumbres en las propiedades del suelo y las posibles variaciones en las condiciones de carga. La distribución de presiones bajo la base, influenciada por la excentricidad causada por el momento volcador, debe mantenerse dentro de límites aceptables para evitar concentraciones excesivas de esfuerzos en el borde del pie del muro.

Los factores de seguridad calculados demuestran un comportamiento satisfactorio de la estructura, en cuanto al factor de Seguridad contra Deslizamiento ($FSD = 2.85 > 1.5$) y al factor de Seguridad contra Volcamiento ($FSV = 2.31 > 2.0$); estos valores superan los mínimos recomendados por las normas de diseño, proporcionando un margen adecuado contra los modos

de falla más críticos. El FSD más alto refleja la considerable resistencia pasiva disponible, mientras que el FSV indica una estabilidad adecuada contra el volcamiento, aunque podría optimizarse mediante ajustes en la geometría de la base si fuera necesario.

El comportamiento estructural previsto se caracteriza por una respuesta satisfactoria ante las solicitaciones de diseño. El momento máximo calculado de 123.45 kN-m/m requiere un área de acero de 600 mm²/m, lo cual es técnicamente viable y económicamente razonable. La deformación lateral esperada en la corona del muro debería mantenerse dentro de límites aceptables (típicamente H/750) debido a la rigidez proporcionada por el empotramiento en la base y el espesor variable de la pantalla. El sistema de drenaje recomendado será crucial para mantener las presiones hidrostáticas dentro de los valores asumidos en el diseño.

El manejo del agua en esta estrategia será una prioridad para evitar daños estructurales y preservar su integridad. Se utilizará un sistema de drenaje francés y vertical para capturar y redirigir el agua acumulada en la zona, rodeado de una capa de grava y geotextil para prevenir obstrucciones. Además, se aplicará un revestimiento impermeabilizante que protegerá la superficie del muro en contacto con el terreno. El control del escurrimiento superficial se garantizará mediante el diseño de una pendiente adecuada del terreno y la implementación de canaletas colectoras. Estas soluciones conjuntas asegurarán la eliminación de posibles puntos de acumulación de agua y la reducción de presiones hidrostáticas, manteniendo así la estructura en óptimas condiciones.

3 Conclusiones

El uso de la tecnología LiDAR permitió obtener un levantamiento topográfico de alta precisión en zonas de difícil acceso y con densa vegetación, donde los métodos convencionales resultarían impracticables en el corregimiento de Roma Chávez, generando un modelo digital del terreno (MDT) con alta resolución. Este levantamiento topográfico es fundamental, ya que facilitó la identificación de puntos críticos inestables y zonas susceptibles a movimientos en masa en el trazado vial Sandoná - Ancuya. La tecnología empleada, además de mejorar el tiempo, minimizó la interferencia en el terreno, una ventaja crucial en áreas como la estudiada, permitiendo una caracterización completa del terreno que sirve como base fundamental para el diseño de estrategias de estabilización de taludes en esta región de alta complejidad geológica.

El análisis multitemporal permitió identificar diferencias significativas entre las elevaciones capturadas en 2022 y 2024, revelando desplazamientos lentos que, aunque imperceptibles a simple vista o mediante métodos convencionales, fueron detectados gracias a la precisión del sistema LiDAR. La comparación de los modelos digitales del terreno en distintos momentos evidenció patrones de inestabilidad y permitió una clasificación adecuada de los movimientos según los criterios de Varnes. Esta metodología multitemporal no solo facilitó la identificación de zonas críticas que requieren intervención, sino que también demostró la importancia de monitorear el terreno en intervalos regulares. El análisis mediante Civil 3D aportó herramientas precisas para evaluar la evolución de los desplazamientos, permitiendo anticipar riesgos y planificar medidas preventivas de forma proactiva, lo que refuerza la seguridad tanto de la población cercana, como de la infraestructura local.

Después de evaluar las estrategias de estabilización de taludes presentadas, se puede concluir que el muro en voladizo (estrategia No. 2) representa la mejor solución, ya que ofrece un equilibrio óptimo entre eficiencia estructural y simplicidad de construcción. A diferencia del muro con mayor diámetro en el pilote y mayores dimensiones, que requiere más volumen de material y procesos constructivos más complejos, o del muro con contrafuerte, que implica una geometría más intrincada, el muro en voladizo utiliza una forma simple y conocida en la industria de la

construcción. Su diseño permite una distribución eficiente de las fuerzas, minimizando el uso de materiales sin comprometer la estabilidad.

Geo5 fue una herramienta de gran utilidad ya que, al ser compatible con la metodología BIM (Building Information Modeling), facilitó la integración y gestión eficiente de la información del proyecto. Esta integración permitió mejorar tiempos en varias etapas del proceso, como el diseño, la elaboración de informes, la realización de cálculos y su respectiva presentación, esto, no solo se ve en la precisión en los resultados, sino que también redujo tiempos de respuesta, lo que contribuyó a una gestión más eficiente del proyecto.

4 Recomendaciones

Implementación de tecnología LiDAR para monitoreo continuo:

Organizaciones gubernamentales y académicas pueden establecer programas de monitoreo regular utilizando LiDAR, ya que esta tecnología ha demostrado ser eficaz para identificar zonas críticas de inestabilidad y patrones de desplazamiento imperceptibles a simple vista

Adopción de obras de contención eficientes:

Se recomienda utilizar diseños como el muro en voladizo por su equilibrio entre simplicidad constructiva, eficiencia estructural y sostenibilidad. Este tipo de muro minimiza el uso de materiales y maximiza la estabilidad del terreno.

Transferencia de conocimientos:

Instituciones educativas y de investigación pueden incluir estudios relacionados con análisis multitemporales y tecnologías avanzadas como Geo5 en los currículos de ingeniería civil, facilitando la formación de profesionales especializados en estabilización de taludes.

Concientización comunitaria:

Es esencial educar a las comunidades locales sobre la importancia de evitar actividades que puedan incrementar la inestabilidad de los taludes, como prácticas agrícolas no sostenibles.

Colaboración interinstitucional:

Promover el trabajo conjunto entre instituciones públicas y privadas para desarrollar estrategias preventivas de gestión de riesgos en áreas similares a Roma Chávez, adaptando los hallazgos de esta investigación a otras regiones geográficas con características comparables.

Organismos gubernamentales y locales:

Implementar un plan de monitoreo continuo de taludes usando tecnología LiDAR para identificar y mitigar riesgos potenciales.

Priorizar la estabilización de áreas críticas a través de obras de contención diseñadas con herramientas avanzadas como Geo5.

Promover regulaciones estrictas para evitar prácticas agrícolas y urbanísticas que aumenten la vulnerabilidad de los taludes.

Comunidad local:

Participar en programas de capacitación para reconocer signos de inestabilidad en taludes y colaborar en el reporte de anomalías.

Evitar actividades que puedan desestabilizar el terreno, como excavaciones no planificadas o cambios abruptos en el uso del suelo.

Organizaciones de investigación y educación:

Fomentar estudios adicionales sobre el uso de tecnología LiDAR para otros tipos de riesgos geológicos.

Promover la integración de tecnologías avanzadas, como drones y sensores remotos, en la formación de nuevos profesionales en ingeniería civil.

Sector privado:

Invertir en soluciones tecnológicas para realizar análisis multitemporales que optimicen la planeación y ejecución de proyectos en áreas con riesgo de movimientos en masa.

Incorporar los métodos de estabilización identificados en la investigación, como muros con pilotes o geomallas, en proyectos de construcción que involucren terrenos inestables.

Referencias

- Arévalo, C. (2014). Análisis geotécnico y de movimientos en masa en el proyecto hidroeléctrico. *Revista de Geología*, (23), 17-29.
- Castellanos, E. M., & Gómez, J. A. (2013). Análisis de la amenaza por movimientos en masa en la cuenca del río Quilcacé, Nariño, Colombia. *Revista de Geología*, (22), 45-58.
- Cepeda, J. (2010). Zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000 en la cuenca del río Otún. *Boletín de Geología*, 32(2), 43-57.
- ColobrasLAB. (2022). Estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, escala 1:5.000 en vía departamental 17NR06-3 Ancuya – Sandoná (Corregimiento de Romachavez), Departamento de Nariño. Sandona - Ancuya .
- CORPONARIÑO, C. A. R. de N. (2019). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica y Acuífero del río Guaitara - Fase de diagnóstico - Caracterización del medio físico biótico de la cuenca*. Pasto: CORPONARIÑO.
- DJI ENTERPRISE. (2023). *enterprose.dji*. Obtenido de <https://enterprise.dji.com/zenmuse-l1>
- engifo, F., Miguel García, L., Agudelo, V., Dionicio, V., Cardona, C., Tobón, G., Llanos, D., Rengifo, R., Franco, E., & Luisa Bermúdez Anibal Ojeda, M. (s.f.). *RED SISMOLÓGICA NACIONAL DE COLOMBIA*. Obtenido de ACTUALIZACIONES E INNOVACIONES: <http://www.ingemina.gov.co>
- Espinosa, D. A., & Rivera, G. J. (2017). Análisis de la vulnerabilidad sísmica en la zona urbana de Pasto, Nariño, Colombia. *Revista de Ingeniería Civil*, (44), 15-28.
- Fundación Biocuenca. (2023). *Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa escala 1:5000 en vía departamental 17NR06-3 Ancuya-Sandoná, corregimiento de Romachavez, Nariño*. Pasto.

- Gatziolis, D., Fried, J.S., y Monleon, V.S. (2010). Desafíos para estimar la altura de los árboles a través de LiDAR en bosques de dosel cerrado: Una parábola del oeste de Oregón. *Ciencias Forestales*, 56(2), 139-155.
- geo5. (2021). *GEO5*. Obtenido de <https://geo5peru.pe/software-geotecnico/caracteristicas/#:~:text=GEO5%20est%C3%A1%20dise%C3%B1ado%20para%20resolver,t%C3%B1el%2C%20estabilidad%20de%20roca>).
- Gobernación de Nariño; Alcaldía de Sandoná. (2023). *Estudio de amenaza vulnerabilidad y riesgos por movimientos en masa Ancuya - Sandoná*. Sandona: Alcaldía de Sandoná.
- Gómez, A. (2021). *Uso de drones y sensores remotos para el monitoreo de laderas: una revisión*. Bogota.
- Gómez, J. A., & González, J. A. (2012). Estudio geológico-geotécnico para la prevención de movimientos en masa en el corredor vial Buenaventura-Loboguerrero. *Revista de Ingeniería geológica*, (33), 21-34.
- Gómez-Betancourt, I. D., Gómez-Betancourt, M., & Bertel-Paternina, L. M. (2010). *Uso de tecnología LiDAR en la evaluación de proyectos viales*. Manizales: Universidad de Manizales.
- Hermelin, M. (2005). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.
- IDIGER. (2022). *Alcaldía Mayor de Bogotá*. Obtenido de Caracterización General del Escenario de Riesgo: <https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>
- Jurado Alonso, M. (2018). *Análisis multitemporal de un área de marismas usando datos LiDAR*. Obtenido de Universidad politécnica de Madrid: <https://oa.upm.es/52304/>

- Leiva, O., Moya Berbeo, H., Trejos González, G., & Carvajal, J. (2012). Metodológica Sistemática Para La Generación De Mapas Geomorfológicos Analíticos Aplicados a La Zonificación De Amenaza Por Movimientos En Masa Escala 1:100.000. *Servicio Geológico Colombiano*, 88.
- Magdaleno, F. y Martínez, R. (2006). Aplicaciones de la teledetección láser (LiDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. *Ingeniería Civil*, 15.
- Maceda Chuquima, J. (2021). *Generación de modelo digital del terreno MDT con tecnología LiDAR y su empleo en ortofotos proyecyo san ignacio de velasco- san matias*. La Paz: Universidad Mayor de San Andres.
- PMA & GEMMA. (2007). Movimientos en masa en la región Andina: una guía para la evaluación de amenazas. 404.
- Ramírez, E. (2021). *Análisis de susceptibilidad por movimientos de masas de los taludes del Km 28 Vía Perimetral a Km 11 Vía a la Costa, provincia del Guayas, Ecuador*. Guayaquil: Universidad de Guayaqui.
- Ruiz, P., Garro, J. y Soto, G. (2014). El uso de imágenes LiDAR en Costa Rica: casos de estudio aplicados en geología, ingeniería y arqueología. *Revista Geologica de America Central*, 51, 7-31.
- Salamanca Céspedes, J. E. y Pérez Castillo, J. (2008). LIDAR, una tecnología de última generación,. *Redalyc*, 11.
- Sandoná, A. m. (2021). *Alcaldía municipal de Sandoná*.
- Santos, L. J. (2005). Ortofoto verdadera (true-orto) y LiDAR, el posible futuro de la cartografía catastral urbana. *Catastro*, 131-154.

- SGC. (11 de febrero de 2024). *Mapa geológico de Colombia*. Obtenido de Portal Servicio Geológico Colombiano:
https://srvags.sgc.gov.co/jsViewer/Mapa_Geologico_colombiano_2023/
- Shan, J., y Toth, C. K. (Eds.). (2018). Rango y escaneo láser topográfico: principios y procesamiento. *Prensa CRC*, pág. 7.
- UNGRD. (2021). *UNGRD*. Obtenido de El deslizamiento es real, boletín para la prevención es de todos. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, Bogotá.:
<https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/32902/Boletin%20Movimiento%20en%20Masa.pdf?sequence=31&isAllowed=y>
- Valencia, C. S. (2018). *Análisis multitemporal por teledetección del cambio de coberturas en las veredas*. Obtenido de Universidad Católica de Manizales:
<https://repositorio.ucm.edu.co/bitstream/10839/2134/1/Gustavo%20Adolfo%20Alzate%20Giraldo.pdf>
- Vargas Uchuari, L.I. & Rey González, D.A. (2023). *Diseño estructural de un muro de contención, bajo parámetros geotécnicos en estado saturado modelado en software Geo5*. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.

Anexos