



Universidad **Mariana**

Evaluación de tecnología LiDAR para el análisis de estabilidad de taludes, caso de estudio
Universidad Mariana del Municipio de Pasto- Nariño

Beatriz Eugenia Narváez Arturo
Laura Gissela Sierra Bolaños
Luiza María Rosas Zambrano

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

2023

Evaluación de tecnología LiDAR para el análisis de estabilidad de taludes, caso de estudio
Universidad Mariana del Municipio de Pasto- Nariño

Beatriz Eugenia Narvárez Arturo

Laura Gissela Sierra Bolaños

Luiza María Rosas Zambrano

Informe de investigación para optar al título de Ingeniero Civil

Asesor

Mg. Juan David Salazar

Ingeniero Civil

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

2023

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

Agradecimientos

Proverbios 16:3 “Pon tus obras en manos del Señor y tus proyectos se cumplirán”

Primero agradecemos a Dios por la oportunidad de que se lograra llegar con éxito y a término este trabajo de grado.

Un agradecimiento especial a la Fundación Biocuenca, al ingeniero David Salazar Goyes, ingeniero Camilo Córdoba e ingeniera Jhoana Gaviria, por poner a disposición de la investigación la tecnología LiDAR, por su profesionalismo, paciencia, enseñanzas en el manejo del equipo y procesamiento de datos capturados.

A la comunidad de Hermanas Franciscanas, especialmente la Hermana Carmen Isabel Valencia y la Hermana Rosa Julia por su confianza y autorización para poder desarrollar el trabajo de grado en la sede principal de la Universidad Mariana, por compartir información esencial para el desarrollo, tanto técnica como de antecedentes sobre la zona específica de estudio.

Al ingeniero Juan David Salazar, por su acompañamiento permanente, por sus gestiones y tiempo extra dedicado para lograr culminar el trabajo correctamente.

A la firma Topo Road, y su representante legal, el Topógrafo Cristian Paz, por sus aportes a la investigación su experiencia y profesionalismo nos permitieron fortalecer el trabajo de grado.

Dedicatoria

“Los éxitos de la vida no representan nada si no tienes con quien compartirlos”. Este trabajo va dedicado a mis PADRES, Jaime Narváez Viteri y Sara Angela Arturo González, por inculcar en mi la responsabilidad y dedicación al estudio.

A mis HIJOS, Isabella y Juan Antonio por brindarme su amor día a día; sin saberlo fueron la fuente de inspiración más grande e inagotable. Gracias por aceptar, involuntariamente, sacrificar tiempo con ellos para poder estudiar y lograr culminar este proceso.

A mis HERMANAS, Angela Marcela y Sara Catalina, que, con sus sabias palabras y sentimientos de orgullo, no dejaron que desista y por el contrario creyeron siempre en mí.

Beatriz Eugenia Narváez Arturo

Salmo 23:1 “El señor es mi pastor nada me falta”. Dedicado a Dios por darme la oportunidad de cumplir este gran sueño, el cual anhelé por mucho tiempo, por poner en mi la motivación correcta y no permitir que desfallezca en el intento.

A mi MAMÁ y su ESPOSO, los cuales me han acompañado en todo el proceso de formación, siendo mi mano derecha, y principales consejeros.

A mi HIJA Isabella, quien me da la fortaleza que necesito para progresar siempre a pesar de las adversidades del camino, y por sus palabras tan sabias a pesar de su corta edad.

A mis TIOS y ABUELOS, que siempre están ahí apoyándome cuando más los necesito, por sus recursos aportados y aún más importante por el ánimo y la seguridad que me proporcionaron en el proceso.

Laura Gissela Sierra Bolaños

Agradezco a Dios, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación académica.

Dedico esta tesis a mis Padres, por ser el pilar más importante en mi vida y mi formación personal, por demostrarme siempre su apoyo incondicional y enseñarme que las metas se deben cumplir con responsabilidad sin importar cuan difíciles sean, siempre de la mano de Dios. A mis abuelitos y toda mi familia por compartir momentos significativos conmigo y por siempre estar dispuestos a ayudarme en cualquier momento. A mi novio por ser mi compañero en gran parte de mis estudios universitarios y por apoyarme siempre. Porque sin ustedes no hubiera logrado este sueño tan anhelado en mi vida.

Proverbios 16:13 “Pon en manos del Señor todas tus obras, y tus proyectos se cumplirán”

Luiza María Rosas Zambrano

Contenido

Introducción	14
1. Resumen del proyecto	16
1.1 Descripción del problema.....	16
1.1.1 Formulación del problema	16
1.2 Justificación.....	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
1.4 Marco referencial o fundamentos teóricos	18
1.4.1 Antecedentes	18
1.4.1.1 Internacionales.	19
1.4.1.2 Nacionales.	20
1.4.1.3 Regionales.	22
1.4.2 Marco teórico	25
1.4.2.1 Topografía.	25
1.4.2.1.1 Topografía convencional.....	25
1.4.2.1.2 Fotogrametría.	25
1.4.2.1.3 Sensado remoto láser.....	26
1.4.2.1.4 Tecnología LiDAR.....	26
1.4.2.1.5 Equipo y funcionamiento.	26
1.4.2.1.6 Aplicaciones de la tecnología LiDAR.....	29
1.4.2.1.7 Captura de puntos del Terreno.	32
1.4.2.2 Generación de Modelos Digitales de Terreno (MDT).	32
1.4.2.3 Talud en suelos.....	35
1.4.2.3.1 Tipos de fallas de taludes.	35
1.4.2.4 Movimientos en masa.....	37
1.4.2.5 Análisis de estabilidad de taludes.....	41
1.4.2.5.1 Métodos de cálculo. Equilibrio Límite.....	41
1.4.2.6 Factor de seguridad.	47

1.4.2.7 Investigación geotécnica.	49
1.4.2.7.1 Recopilación de información preliminar.	49
1.4.2.7.2 Reconocimiento Geológico de campo.	49
1.4.2.7.3 Planificación de exploración y muestreo.	50
1.4.2.7.4 Ejecución de la exploración y muestreo directo en campo.	50
1.4.2.7.5 Ejecución de ensayos de laboratorio.	50
1.4.2.8 Resistencia al Esfuerzo cortante.	52
1.4.2.8.1 Circulo de Mohr.	56
1.4.2.9 Software de modelación.	56
1.4.2.9.1 Slide 2D.	56
1.4.2.10 Medidas de mitigación (Mantos).	56
1.4.2.10.1. Manto temporal BIOTEX.	56
1.4.2.10.2 Manto permanente ABSORMAT.	57
1.4.2.10.3 Terratrac TRM 15, taludes con inclinación.	57
1.4.2.10.5 Anclajes tipo GRIPPLE.	59
1.4.3 Marco contextual.	59
1.4.4 Marco legal.	60
1.5 Metodología.	61
1.5.1 Campo de investigación.	61
1.5.2 Enfoque o tipo de investigación.	61
1.5.3 Tipo de investigación.	62
1.5.4 Diseño de la metodología.	62
2. Presentación y análisis de resultados.	64
2.1 Procesamiento de la información y análisis de resultados objetivo 1.	64
2.1.1 Marco geológico de la zona de estudio.	64
2.1.2 Geología estructural.	66
2.1.3 Hidrología y geomorfología.	68
2.1.4 Sismicidad.	69
2.1.5 Antecedentes movimientos en masa.	70
2.1.6 Geología local- Resultados exploración y muestreo en el sitio de estudio.	71
2.1.7 Caracterización sísmica local.	75

2.1.8 Tecnología LiDAR.....	76
2.2 Procesamiento de la información y análisis de resultados objetivo 2	78
2.2.1 Modelo digital del terreno con datos LiDAR.....	78
2.2.2 Modelo digital del terreno con topografía convencional	88
2.2.3 Modelo digital del terreno con fotogrametría	95
2.2.4 Comparación Modelos de elevación digital de terreno con diferentes tecnologías	98
2.3 Procesamiento de la información y análisis de resultados objetivo 3	105
3. Conclusiones	113
4. Recomendaciones.....	115
Referencias bibliográficas.....	116

Índice de Tablas

Tabla 1. Antecedentes internacionales	19
Tabla 2. Antecedentes nacionales	21
Tabla 3. Antecedentes regionales	22
Tabla 4. Técnicas para obtención de MDT	33
Tabla 5. Tipos de fallas	36
Tabla 6. Tipos de movimientos en masa	37
Tabla 7. Factores que propician los movimientos en masa.....	38
Tabla 8. Métodos más utilizados, para determinar FS	47
Tabla 9. Factores de seguridad mínimos-NSR colombiana-2012 H.2.4-1.....	49
Tabla 10. Valores típicos del parámetro A.....	55
Tabla 11. Normativas para análisis de taludes	61
Tabla 12. Diseño de la metodología.....	62
Tabla 13. Sistemas de Fallas municipio de Pasto.....	67
Tabla 14. Resultados ensayos laboratorio 5 apiques y 3 muestras adicionales.....	73
Tabla 15. Parámetros de suelo obtenidos del ensayo de corte directo	74
Tabla 16. Requisitos generales de diseño y construcción sismorresistente	75

Índice de Figuras

Figura 1. Elementos del sistema LiDAR aerotransportado.....	27
Figura 2. Aplicaciones LiDAR en caracterización y gestión del medio fluvial y forestal.....	30
Figura 3. Aplicación LiDAR para fenómenos de remoción en masa.....	31
Figura 4. Monitorización de talud rocoso mediante datos LiDAR	31
Figura 5. Disposición de una muestra de puntos sobre el terreno.....	32
Figura 6. Diagrama del factor fo utilizado en el método de Janbú	42
Figura 7. Fuerzas sobre dovela para método de Fellenius	43
Figura 8. Método de Bishop simplificado.....	44
Figura 9. Método de Spencer	46
Figura 10. Factor de seguridad.....	48
Figura 11. Resistencias pico y residual	54
Figura 12. Dirección de esfuerzos principales en la falla de un talud.....	55
Figura 13. Manto temporal BIOTEX	57
Figura 14. Manto permanente ABSORMAT	57
Figura 15. Terratrac TRM	58
Figura 16. Mantos TRM 15.....	58
Figura 17. Anclajes tipo gripple	59
Figura 18. Ubicación Universidad Mariana	60
Figura 19. Composición geológica escala 1:100.000 municipio de Pasto	65
Figura 20. Mapa de unidades geológicas superficiales de Pasto escala 1:10.000.....	66
Figura 21. Geomorfología municipio de Pasto	68
Figura 22. Zonas de amenaza sísmica departamento de Nariño	69
Figura 23. Sismicidad histórica municipio de Pasto	70
Figura 24. Antecedentes de remoción en masa en el municipio de Pasto.....	71
Figura 25. Distribución de 5 apiques y 3 puntos para toma de muestras adicionales.....	72
Figura 26. Zenmuse L1 LiDAR y RGB	76
Figura 27. Dron matrice 300 RTK de DJI.....	77
Figura 28. Estación D-RTK2 de DJI + Leica GPS 1200	78
Figura 29. Esquema de levantamiento topográfico.....	79

Figura 30. Calibración de equipos para vuelo con LiDAR	79
Figura 31. Mapa satelital	80
Figura 32. Delimitación del área de levantamiento.....	81
Figura 33. Definición de parámetros antes de vuelo	81
Figura 34. Calibración de IMU aérea	82
Figura 35. Elevación de vuelo	82
Figura 36. Levantamiento topográfico instantáneo	83
Figura 37. Ubicación de estación RTK y asignación de parámetros para reconstrucción de nube de puntos LiDAR	84
Figura 38. Resultado reconstrucción de nube de puntos LiDAR formato LAS.....	84
Figura 39. Creación de proyecto en spatix	85
Figura 40. Comparación de color vs trayectorias de vuelo	86
Figura 41. Recorte de overlape, suavizado y reducción de punto de ruido.....	86
Figura 42. Clasificación de puntos de terreno	87
Figura 43. Creación de modelo digital de elevaciones con global mapper y generación de curvas de nivel	87
Figura 44. Modelo digital de terreno con topografía LiDAR	88
Figura 45. Esquema levantamiento topográfico convencional	89
Figura 46. Montaje y calibración de puntos de referencia	90
Figura 47. Montaje y calibración de estación total	91
Figura 48. Selección del archivo de trabajo topografía convencional	91
Figura 49. Levantamiento topográfico	92
Figura 50. Procesamiento de datos.....	93
Figura 51. Curvas de nivel	93
Figura 52. Área de levantamiento	94
Figura 53. Modelo Digital de Terreno con topografía convencional	94
Figura 54. Esquema levantamiento topográfico con fotogrametría	95
Figura 55. Ortofoto.....	96
Figura 56. Definición de área de estudio con fotogrametría	97
Figura 57. Modelo digital de superficie con fotogrametría.....	97
Figura 58. Modelos digitales con los 3 métodos de levantamiento topográfico	99

Figura 59. Perfiles topográficos, Universidad Mariana.	100
Figura 60. Comparación perfiles topográficos Corte N. 1	101
Figura 61. Comparación perfiles topográficos Corte N. 2	102
Figura 62. Comparación perfiles topográficos Corte N. 3	103
Figura 63. Comparación perfiles topográficos Corte N. 4	104
Figura 64. Comparación perfiles topográficos Corte N. 5	105
Figura 65. Metodología análisis de estabilidad del talud en Slide	106
Figura 66. Perfil N° 4 con topografía LiDAR importado a Slide	106
Figura 67. Ingreso de datos geotécnicos para correr el modelo en slide.....	107
Figura 68. Resultado del análisis de estabilidad del talud-estático.	108
Figura 69. Resultado del Análisis pseudoestático	109
Figura 70. Grietas presentes en el talud	110
Figura 71. Fallas presentes en el suelo	110
Figura 72. Esquema de protección con empradizado para taludes de terraplén.	111
Figura 73. Perfil proyectado de talud con proyección de solución para estabilización con TERRATRAC® TRM 15, anclajes Gripple TLA-3 de 1,2m de longitud.	112

Introducción

El desarrollo tecnológico y la innovación, aumenta la productividad y la eficiencia de las actividades humanas en distintos campos y la rama de la ingeniería civil no es la excepción. Hoy en día, desde diseños asistidos por computadoras, novedosos programas que realizan en segundos los cálculos que antes de efectuaban de manera manual y hasta maquinaria que imprime y edifica, son algunos ejemplos de cómo el avance tecnológico reduce tiempo, costos y se ha vuelto una herramienta que acompaña el día a día del ingeniero. Esta investigación, busca impulsar la aplicación en la región de la tecnología LiDAR, de las siglas Light Detection and Ranging, haciendo énfasis en uno de sus usos, el levantamiento topográfico con alta precisión para la configuración del modelo digital del terreno (MDT). Esta tecnología, es una herramienta revolucionaria tanto en el área de la cartografía como en el área forestal, es altamente viable en países como México, Guatemala, Estados Unidos (Gisasola, 2018) sin embargo, en Colombia su acceso aún es limitado y su utilización es reducida al sector privado, de ahí la importancia de aplicar y divulgar los resultados desde la academia.

El objetivo principal de la investigación es evaluar y dar a conocer la tecnología LiDAR desde sus bases teóricas hasta sus aplicaciones, comparando el MDT creado con datos LiDAR con MDT creado con datos de topografía convencional, básicamente medición directa en campo a través de estación total, y con fotogrametría a partir de dron. Dentro de los principales resultados se resalta que el trabajo en campo y la captura de datos es mucho más rápida y eficiente con LiDAR, ya que, en 4 minutos de vuelo, se recolecto la información topográfica de 3 hectáreas de terreno mientras que con la topografía convencional se necesitó media jornada laboral (4 horas). En ese mismo sentido, para efectuar la topografía convencional fueron necesarias 4 personas, y el levantamiento con LiDAR se realizó con una sola persona. En cuanto a la precisión de los MDT se encontró que el levantamiento con LiDAR aporta mayor detalle al capturar 291 puntos por metro cuadrado mientras que con la topografía convencional se capturan de 2 a 3 puntos por metro cuadrado.

Adicional a ello, considerando la alta vulnerabilidad del municipio de Pasto frente a fenómenos de remoción en masa, el producto obtenido con esta tecnología fue empleado para realizar el análisis de estabilidad de un talud ubicado en la sede principal de la Universidad Mariana. Este

talud, de acuerdo a los antecedentes, ha generado impactos menores, desprendimiento de material, afectación parcial a la vía, representando un riesgo potencial por movimiento en masa para los habitantes del barrio Versailles y la población en general que transite por la zona, especialmente en época de lluvia.

Para efectuar el análisis de estabilidad de talud se partió de la caracterización geotécnica local obtenida de estudios de suelo de acuerdo a lo recomendado por la NSR-10, que consistió básicamente en 5 apiques a una profundidad de 6 metros y 3 a profundidad de 10 y 11,5 metros. De las muestras recolectadas se efectuaron ensayos generales de granulometría, límites de consistencia y corte directo. De manera general se encontraron varios tipos de estratos incluido capa vegetal (limo orgánico), y limos arenosos de alta compresibilidad colores grises, habano claro, habano oscuro y cafés. No se encontró nivel freático. Con relación a los parámetros esenciales se encontró un peso unitario de 16.6 KN /m³, cohesión de 83 KN/ cm² y ángulo de fricción de 30.7°.

Con estos datos de geología local y el MDT con datos LiDAR se corrió el modelo en el software SLIDE y se determinó el factor de seguridad estático de 2.190 y pseudoestático de 0.684.

Finalmente, se tiene como productos insumos valiosos para la universidad tales como: plano de topografía convencional y topografía LiDAR, ortofoto de la universidad, modelos digitales de terreno y planos de consideraciones técnicas para estabilidad, revegetalización y control de aguas en el talud.

1. Resumen del proyecto

1.1 Descripción del problema

Hasta hace poco tiempo, la medición de cualquier objeto en terreno se hacía exclusivamente con teodolitos o estaciones totales. Paralelamente al incremento de la utilización de herramientas 3D aumentó la necesidad de mediciones más precisas y rápidas; los métodos topográficos clásicos que emplean estaciones totales tienen inconvenientes como: todos los puntos a medir tienen que estar predefinidos con exactitud antes de la medición en campo, todos los objetos tienen que ser alcanzables por el topógrafo, las mediciones de puntos son lentas y costosas, las jornadas de medición duran mucho tiempo (Ojeda-Pardo et al., 2014).

Por otro lado, la utilización de un láser escáner genera beneficios como: información precisa, fiable y exhaustiva, se reduce el tiempo de levantamiento, minimizan errores de ingeniería debido a la disponibilidad de un gran número de puntos 3D precisos, dependiendo del equipo puede llegar a capturar hasta 500 puntos por metro cuadrado, frente a 1 o 3 puntos por m² que otorga la topografía convencional, además es capaz de atravesar la cobertura vegetal, logrando capturar información en lugares de difícil acceso (García y Biosca, 2008).

En ese sentido se desea evaluar la precisión de la tecnología LiDAR comparándola con métodos tradicionales como levantamiento topográfico en campo y fotogrametría y emplear el MDT para el análisis de estabilidad del talud a través del software SLIDE.

1.1.1 Formulación del problema

Considerando que se desea evaluar la tecnología LiDAR comparándola con otros métodos de generación de datos topográficos, se plantea el siguiente interrogante: ¿Cuál es la diferencia entre la precisión de un método convencional y la tecnología LiDAR en el levantamiento de información topográfica?

1.2 Justificación

Actualmente en la universidad, la metodología que utilizan los estudiantes de ingeniería civil para levantamientos topográficos son métodos convencionales, utilizando equipos como, estación total, por ende, los estudiantes requieren de un largo tiempo para el procesamiento de datos y así finalmente obtener un resultado. Así mismo, en el talud intervenido actualmente de la universidad se utilizó el método mencionado anteriormente.

Esta metodología es una de las más utilizadas para todo estudio topográfico, no obstante, con cierto porcentaje de error tanto en la distancia horizontal como en lo angular (en un rango de 2mm a 5mm y 0.0003 a 0.0014 grados respectivamente), por lo general estos errores suelen estar en la estación total que vienen desde fábrica, además de que los puntos que se toman para el levantamiento son generalmente cada (metros). A diferencia de esta metodología y su respectivo porcentaje de error, un levantamiento con tecnología LiDAR brinda una topografía mucho más exacta ya que su nube de puntos puede indicar hasta 500 puntos por metro cuadrado y una precisión de elevación vertical de menos de 3 cm, por ende, lo convierte en una metodología mucho más exacta.

Este trabajo de investigación, permite aplicar conocimientos adquiridos de diferentes asignaturas de la carrera de Ingeniería Civil, tales como geología, mecánica de suelos, geotecnia, topografía, cartografía entre otros, así como la profundización en dichas áreas.

Con la evaluación de la tecnología LiDAR para el análisis de estabilidad del talud se pretende corroborar la presión y exactitud que tienen los estudios realizados en el mismo. De igual manera se quiere establecer un precedente de innovación al ser uno de los primeros lugares donde se utiliza dicha tecnología, a nivel institucional y a nivel departamental.

Finalmente, además de la aplicación y comparación de la tecnología se desea efectuar el análisis de estabilidad del talud (ubicado en la sede principal de la Universidad Mariana) y proponer, en caso de ser necesario, medidas técnicas básicas que aporten en la prevención del riesgo por movimiento en masa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la tecnología LiDAR para analizar la estabilidad de un talud localizado en la sede principal de la Universidad Mariana.

1.3.2 Objetivos específicos

- Revisar de manera sistemática la información del sitio de estudio para caracterizar la zona y la tecnología a aplicar para creación del MDT.
- Comparar los modelos de elevación digital del terreno con diferentes metodologías.
- Realizar el análisis de estabilidad de talud por el método de equilibrio límite usando el MDT de los datos obtenidos con LiDAR.

1.4 Marco referencial o fundamentos teóricos

1.4.1 Antecedentes

En los siguientes ítems se presentará de manera resumida los respectivos antecedentes relacionados con la tecnología LiDAR en distintas aplicaciones en el campo de ingeniería civil, especialmente la creación de modelo digital de terreno para análisis de estabilidad de taludes.

1.4.1.1 Internacionales.

Tabla 1

Antecedentes internacionales

Título de la investigación	Resumen	Resultado
<p>Análisis y validación de métodos digitales de elevaciones mediante datos LiDAR (Moreno et al., 2010).</p>	<p>En este trabajo efectuado en el Campo de Cartagena, región de Murcia-España, se realizó un análisis comparativo entre Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) generados mediante diferentes métodos de interpolación (lineal, splines, TIN y ANUDEM) y uno obtenido mediante tecnología LiDAR. Finalmente se establece cuál de los modelos interpolados representa con mayor fidelidad la superficie terrestre.</p>	<p>Los mejores resultados de los métodos de interpolación parecen obtenerse con los algoritmos TIN y ANUDEM, los resultados son diferentes según la variable y el indicador de error que se tenga en cuenta. Y con respecto a la tecnología LiDAR los resultados fueron más precisos y exactos, según su indicador de error.</p>
<p>Elaboración del modelo digital de elevaciones mediante tecnología 3D láser escáner (Ojeda-Pardo et al., 2014)</p>	<p>Este trabajo fue realizado en Cuba, el propósito fue establecer un procedimiento para introducir la tecnología 3D láser escáner en las labores mineras. Para ello evaluaron las posibilidades reales de obtención de modelos empleando esta tecnología que resulta más productiva, eficiente y precisa.</p>	<p>Como se resultado se tuvo que con el 3D láser escáner se obtiene mayor confiabilidad, menos riesgos y una menor afectación al medio ambiente en comparación con el uso de la estación total.</p>

Título de la investigación	Resumen	Resultado
El uso de imágenes LiDAR en Costa Rica: Casos de estudio aplicados en geología, Ingeniería y arqueología (Ruiz et al., 2014)	Esta investigación hace una reseña histórica sobre la evolución de la tecnología LiDAR, sus mejoras y adiciones de otras tecnologías en los últimos 15 años. Se presenta información del funcionamiento de LiDAR terrestre y aéreo, parámetros técnicos para la adquisición de datos y sus resoluciones. Se exponen los resultados de 4 estudios en Costa Rica.	Con la información que se expone en este trabajo se ha generado un insumo detallado, para que otros potenciales usuarios de esta tecnología puedan contar con algunos datos y ejemplos gráficos, que los ayude en la toma de decisiones antes de contratar un vuelo o un escaneo con un equipo LiDAR en tierra.
Análisis de deslizamiento mediante técnicas UAV y LIDAR en Ruta 115 CH, paso Pehuenche, sector Monjes Blancos, Región de Maule, Chile (Becerra y Rurange, 2021).	Se genera un análisis multitemporal de remociones en masa del tipo deslizamiento rotacional para determinar evolución y seguimiento de este proceso geodinámicos, basándose en comparación de Modelos de Elevación Digital (DEM) procesados de vuelos LIDAR (Light detection and ranging) y UAV (Unmanned Aerial Vehicle), uso de geomática y trabajo de campo. L	Los resultados obtenidos establecen movimientos superficiales de deslizamientos mayores a un metro, en un periodo de 20 meses. Los resultados permiten demostrar la eficacia de combinar los métodos UAV – LiDAR para evaluar características geomorfológicas y proceso evolutivo de la inestabilidad.

1.4.1.2 Nacionales. En la siguiente tabla se presentan los antecedentes de investigaciones empleando la tecnología LiDAR en el territorio colombiano.

Tabla 2

Antecedentes nacionales

Título de la investigación	Resumen	Resultado
Monitoreo superficial de movimientos en masa, empleando tecnología LiDAR, relacionando la geología, topografía e información geotécnica del sitio (Galvis, 2016).	En este proyecto de grado, se ha implementado la tecnología de detección de imágenes por escaneo de láser, o sus siglas en ingles LiDAR (Light Detection and Ranging), para realizar el monitoreo de una zona específica ubicada a las afueras de la ciudad de Medellín, Antioquia, entre los meses de diciembre de 2015 y junio de 2016	El levantamiento topográfico empleando el equipo LiDAR, fue mucho más rápido en términos de trabajo de campo y procesamiento de la información, comparado a la metodología convencional, adicional a ello, la precisión del resultante topográfico es muy superior debido al volumen de la información por escaneo (20 millones de puntos) para 14 escaneos en el sitio.
Uso de tecnología LiDAR en evaluación de proyectos viales (Gómez et al., 2010)	Este proyecto resalta la necesidad de obtener cartografía con altos estándares de calidad para la evaluación de todo tipo proyectos de ingeniería e investigación, presentando la tecnología LiDAR como una opción para la consecución de estos resultados.	Como resultado se presentan los campos de aplicación de esta tecnología y se explica la metodología para proyectos de infraestructura vial basado en experiencias de proyectos de Colombia y Brasil.
Análisis comparativo de modelos digitales de terreno obtenidos por tecnología LiDAR con aeronave no tripulada y por fotogrametría con	Este proyecto expone las diferencias significativas que se obtienen a la hora de comparar un MDT a partir de un sensor LiDAR transportado por una aeronave no tripulada y un MDT	Una vez se realiza la comparación entre el MDT LiDAR versus el MDT Fotogramétrico se evidencia gran pérdida de información en la nube de puntos fotogramétrica que corresponde a

Título de la investigación	Resumen	Resultado
UAV en zona de montaña (Avella, 2022).	obtenido a partir de fotogrametría por UAV en un área rural con condiciones topografías montañosas en el municipio de Yotoco, Valle del Cauca.	un 33% con respecto a la nube de puntos LiDAR. Esta pérdida de información en fotogrametría se da principalmente en las zonas que presentan área de bosque denso o vegetación arbustiva.
Diseño y construcción de un sistema óptico de monitoreo atmosférico aplicado a la determinación de la capa límite atmosférica en la ciudad de Medellín (Nisperuza, 2010)	En este trabajo se desarrolló un sistema de censado remoto aplicado a estudios atmosféricos conocido como LiDAR (acrónimo de Light Detection And Ranging). Este tipo de sistemas sirven como complemento a todo el conjunto de sistemas meteorológicos y de medida de contaminantes atmosféricos.	Se formuló el diseño, acople, la optimización y la puesta en funcionamiento de una estación LiDAR en el campus de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, completamente funcional para aplicaciones de la dinámica atmosférica de la región.

1.4.1.3 Regionales. En la siguiente tabla se presentan las investigaciones desarrolladas con tecnología LiDAR en la región de Nariño.

Tabla 3

Antecedentes regionales

Título de la investigación	Resumen	Resultado
Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas	La investigación comprendida entre Salahondita y Candelillas de la Mar, en el municipio de	Con la tecnología LiDAR se logró identificar Geomorfológicamente la zona encontrando 9 unidades;

Título de la investigación	Resumen	Resultado
<p>vegetales asociadas, a través de sensores remotos, en la costa de Tumaco, Nariño (Bermúdez et al., 2014).</p>	<p>Tumaco (Nariño), describe las características geomorfológicas y de cobertura vegetal a lo largo de 823.4 km de la costa Pacífica sur de Colombia utilizando teledetección y productos derivados de datos Light Detection and Ranging.</p>	<p>predominan las planicies costeras con un 87.8 % del área total estudiada (45960.53 ha), que a su vez se constituyen por plataformas intermareales no vegetadas, planos de inundación y planos y llanuras con vegetación halófitas; La cobertura vegetal que más abunda en el área de estudio es el manglar con un 61.14%.</p>
<p>Penetración de la señal del sistema ALS40 LiDAR aerotransportado en la cobertura vegetal presente en las islas: La Viciosa y El Morro (Rengifo y Puentes, 2007).</p>	<p>El trabajo ilustra una metodología para determinar la capacidad de penetración del equipo en la cobertura vegetal característica en las islas La Viciosa y El Morro, con el objetivo de determinar la influencia en las cubiertas vegetales de la señal de un LiDAR aerotransportado y la cantidad de información real del suelo que se obtiene y es usada para la elaboración de modelos digitales, entre otras aplicaciones. El estudio se basó en el cálculo e interpretación del índice de penetración del LiDAR en cada tipo de vegetación identificado en la</p>	<p>Se encontró que la capacidad de penetración de la señal del láser del ALS40 en la vegetación de la zona es baja. Ésta puede ser mejorada a partir de ajustes en la calibración del sistema y consideraciones respecto a la zona de levantamiento. Aun así la técnica LiDAR aplicada es de las más precisas para la adquisición de información altimétrica y planimétrica del terreno.</p>

Título de la investigación	Resumen	Resultado
	<p>zona, a partir del número de puntos LiDAR correspondientes tanto a cobertura vegetal como a suelo.</p>	
<p>Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimiento en masa escala 1:5000 en vía departamental 17NR06-3 Ancuya-Sandoná, corregimiento de Romachavez, Nariño (Fundación Biocuenca, 2023).</p>	<p>La zona de estudio presenta antecedentes de fenómenos de remoción en masa de tipo caída, volcamiento, deslizamiento, propagación lateral y flujos de grandes magnitudes, por lo tanto, se efectuaron estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo a escala 1:5000. Considerando la escala de los estudios se requirió información topográfica detallada para conocer con exactitud la realidad morfológica del terreno por lo cual se empleó el dron matrice 300 RTK, el sensor LiDAR+RGB Zemnuse L1 de la marca DJI, una estación D-RTK2 de DJI y un Leica GPS1200+ series (Sistema GNSS de alta precisión).</p>	<p>La zona de estudio presenta una amenaza significativa de movimientos en masa, con aproximadamente un 85% de la zona en amenaza media o alta lo que sugiere la necesidad de implementar medidas de prevención y mitigación para reducir dicho riesgo. Respecto a la aplicación de la tecnología LiDAR, se logró efectuar la topografía de cerca de 1000 hectáreas optimizando tiempo y recursos de personal en campo.</p>

1.4.2 Marco teórico

1.4.2.1 Topografía. La topografía es una ciencia que estudia el conjunto de procedimientos para determinar las posiciones relativas de los puntos sobre la superficie de la tierra y debajo de la misma, mediante combinación de las medidas según los tres elementos del espacio: distancia, elevación y dirección. Explica los procedimientos y operaciones del trabajo de campo, los métodos de cálculo o procesamiento de datos y la representación del terreno en un plano o dibujo topográfico a escala (Rincón et al., 2017).

La finalidad de todo trabajo topográfico es la observación en campo de una serie de puntos que permita posteriormente la obtención de sus coordenadas para hacer una representación gráfica de la zona, conocer su geometría, altimetría, calcular una superficie, longitud, desnivel, entre otros. Los métodos topográficos son diversos y a continuación se señalan algunos de ellos:

1.4.2.1.1 Topografía convencional. En este método, para dar coordenadas de un punto se utiliza un sistema de coordenadas esféricas o polares que posteriormente permite obtener coordenadas cartesianas. Para ello se necesita conocer dos ángulos y una distancia; para efectuar las mediciones se emplea una estación total y se combina con el uso de GPS. Con estos instrumentos se pueden medir ángulos horizontales, ángulos verticales y distancias. Conociendo las coordenadas del lugar donde se ha colocado la Estación es posible determinar las coordenadas tridimensionales de todos los puntos que se midan y procesando posteriormente las coordenadas de los datos tomados es posible representar gráficamente los detalles del terreno considerados. Con las coordenadas de dos puntos se hace posible además calcular las distancias o el desnivel entre los mismos puntos, aunque no se hubiese estacionado en ninguno (Castañeda y Martínez, 2018).

1.4.2.1.2 Fotogrametría. La fotogrametría es la técnica cuyo objetivo es el conocimiento de las dimensiones y posición de objetos en el espacio, a través de la medida o medidas realizadas a partir de la intersección de dos o más fotografías, permite a partir de información en 2D como lo es una imagen aérea, obtener un resultado en 3D como lo es la representación de una superficie o MDT (Avella, 2022).

1.4.2.1.3 Sensado remoto láser. El sensado remoto permite adquirir información acerca de un sistema sin estar en contacto físico con él. Cuando se utiliza luz para la obtención de dichas propiedades se conoce como LiDAR, un acrónimo de Light Detection And Ranging.

1.4.2.1.4 Tecnología LiDAR. La tecnología LiDAR proviene del acrónimo en inglés “Laser Imaging Detection and Ranging” o “Light Detection and Ranging” que en español se podría expresar como “detección de imágenes por láser y distancia” (Ruiz et al., 2014). Se trata de una tecnología de sensores remotos, que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. La distancia al objeto se determina midiendo el tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección a través de la señal reflejada (Gisasola, 2018).

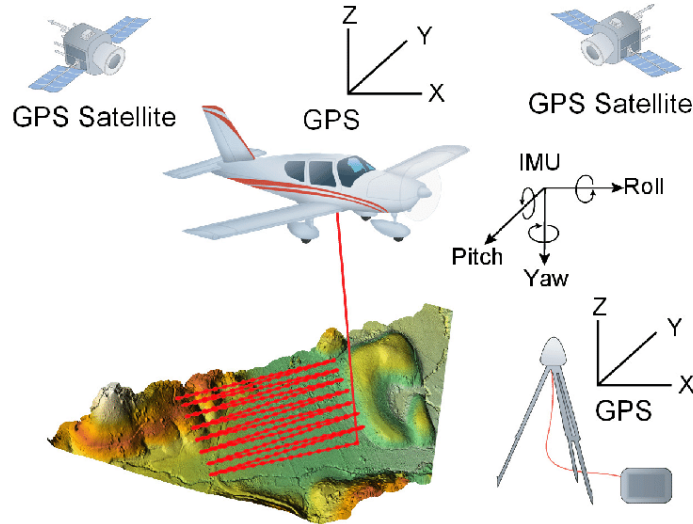
LiDAR transmite muy rápidamente pulsos de luz que se reflejan del terreno y de otros objetos obteniéndose puntos de las alturas o puntos de elevación. El pulso de vuelta se convierte de fotones a impulsos eléctricos y se recoge por un registrador de datos de alta velocidad. Dada una relación para la velocidad de la luz, los intervalos del tiempo entre la transmisión y la recepción de los pulsos se pueden calcular con el fin de conocer las alturas de los puntos de un terreno, estos intervalos de tiempo se convierten a unidades de distancia con base en la información posicional obtenida mediante los receptores del Sistema de Posicionamiento Global (Salamanca y Pérez, 2008).

Esta técnica que originalmente era utilizada con fines militares, en la actualidad se convierte en una técnica alternativa a las técnicas topográficas y fotogramétricas para la generación de Modelos Digitales de Terreno (MDE) de gran densidad y precisión (Gómez et al., 2010).

1.4.2.1.5 Equipo y funcionamiento. Ibáñez (2007) precisa que el sistema LiDAR consiste esencialmente en un sensor láser instalado en una plataforma aérea que barre las superficies que se encuentran entre el sensor y el terreno obteniendo una nube de puntos de coordenadas precisas; el equipo está compuesto por un sensor láser, un sistema inercial de navegación (INS) y un receptor GPS en una plataforma, en tierra se dispone una red GPS para trabajar de forma conjunta con el receptor GPS de la plataforma.

Figura 1

Elementos del sistema LiDAR aerotransportado



Fuente: Magdaleno y Martínez (2006).

- **El sensor laser** mide las distancias de la plataforma al terreno. Existen multitud de configuraciones del sensor, empezando por el modo de trabajo del láser empleado, que puede ser de pulso (envía pulsos a intervalos regulares de tiempo) o de onda continua; otro parámetro que define el funcionamiento del sensor es la trayectoria que describe sobre el terreno la señal reflejada por la óptica de salida del sensor láser, esta puede ser en forma de Z o de U (para el caso de láser de pulso con un espejo oscilante) o de lazos encadenados (láser de onda continua). El sensor receptor de la señal se encuentra solo al emisor, este mide la potencia de retorno de la señal de modo continuo, se identifican picos de energía como retornos, cada sistema registra distintos retornos. Algunos registran el último pulso, otros los tres primeros, otros el primer y último pulso, etc, esto se configura de acuerdo a la aplicación (Gómez et al., 2010).
- **Sistema de Navegación Inercial (INS).** El sistema orienta la plataforma tomando como punto fijo la posición de la antena GP; la unidad que realiza esta función es la unidad inercial (IMU), la cual de termina los tres movimientos principales: giro, alabeo, y cabeceo, estos

permiten dar coordenadas al centro óptico del sensor láser, relacionando los orígenes de coordenadas GPS y del láser. El sistema está compuesto en general por tres acelerómetros y giróscopos dispuestos en las tres direcciones del espacio, los datos obtenidos son las aceleraciones en las tres direcciones del espacio y las variaciones angulares. Procesando esta información se obtienen los tres giros entre el origen del GPS y el origen del láser (Gómez et al., 2010).

- **Sistema GPS.** El objetivo de este sistema es determinar la posición de la plataforma. Para alcanzar las máximas precisiones en el avión se sitúa un receptor GPS doble frecuencia, mientras que en tierra se establece una red que realiza una observación simultánea con el medio móvil. La frecuencia del sistema varía entre 1Hz y 2Hz, los sistemas disponibles trabajan en tiempo real y/o en pos proceso; las precisiones en ambos sistemas son entre 30 cm. y 3 m., y de 10 cm. a 15 cm, en pos proceso se obtienen precisiones de hasta 5 cm. En el modo de trabajo en pos proceso es necesario establecer una red GPS en tierra, se recomienda usar más de una estación con una línea base máxima de 20 km, aunque algunos fabricantes de software de pos proceso recomiendan líneas base inferiores a 10 km; No se recomienda trabajar con un número de satélites igual o inferior a 5 y un PDOP (*Position Dilution of Precision*) (Gómez et al., 2010).
- **Integración sistemas Láser-INS/GPS.** Los tres sistemas, ya descritos, se integran en la plataforma, actualmente las antenas GPS no requieren ninguna orientación. El sensor láser se instala con el sistema de referencia orientado según la dirección de vuelo (eje x) y con el eje Z hacia los objetos escaneados (parte inferior del avión), adicionalmente al sistema, se instala una cámara digital o de video para tener información visual del área levantada por el sensor láser, esta información es de gran utilidad en el posproceso, en la fase de clasificación de puntos. Con todo este proceso se consigue obtener las coordenadas de la superficie levantada, la nube de puntos obtenida contiene toda la información de los elementos que se encontraban durante el levantamiento entre el sensor y el terreno; así la nube de puntos, además del terreno, contiene otra información: edificios, vegetación, vehículos, etc. (Ibáñez et al., 2007).

1.4.2.1.6 Aplicaciones de la tecnología LiDAR. Las aplicaciones son en distintas áreas, resaltando el área forestal al ser uno de los primeros campos en los que se investigó la aplicación de estas técnicas; mediante el empleo de las técnicas de altimetría láser es posible obtener de una forma precisa la topografía tanto del terreno como las cubiertas vegetales en función de los retornos del láser dentro de los trabajos de post-proceso de los datos; esto es una peculiaridad de estos sistemas por lo que los sistemas de altimetría láser aerotransportada son una técnica de gran interés para la gestión de recursos forestales.

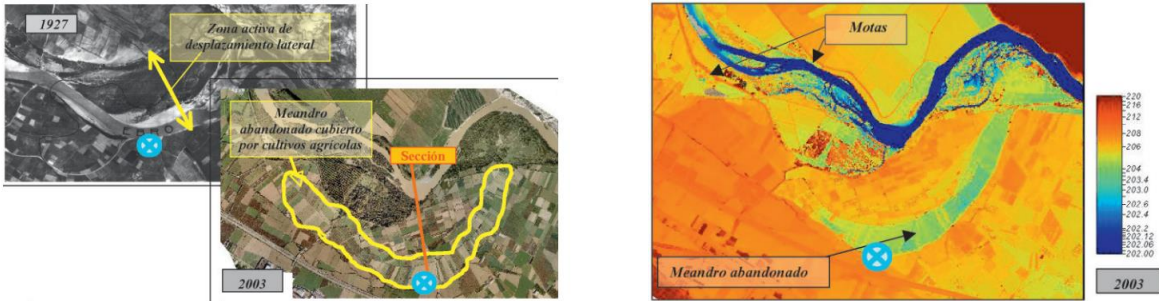
Otra aplicación corresponde a la generación de modelos tridimensionales urbanos, considerado como uno de los campos de mayor interés en la cartografía actual, la dinámica física y económica de las zonas urbanas requiere disponer de manera apremiante de una cartografía precisa y actualizada. Los modelos digitales de superficie de ciudades tienen diversas aplicaciones entre las que se pueden indicar las telecomunicaciones (telefonía móvil), los modelos atmosféricos, la planeación y monitoreo de riesgos ambientales, sin olvidar, la propia gestión de tipo urbanístico (Gómez et al., 2010).

En ese mismo sentido se aplica tecnología LiDAR para generar cartografía de riesgos de avenidas torrenciales e inundaciones, para zonas de acceso complejo, zonas costeras, planificación de rescate y ayuda en caso de desastres de origen natural, socio natural o antrópico. Con lo anterior se rescata que el uso de sensores remotos aerotransportados urbanos dentro de modelos multidimensionales se ha constituido en un área de investigación de mucha importancia, para los diferentes tipos de investigadores. Investigadores de una amplia variedad de disciplinas que incluyen computación, geometría computacional, GIS y percepción remota, se encuentran inmersos en esta área (Salamanca y Pérez, 2008)

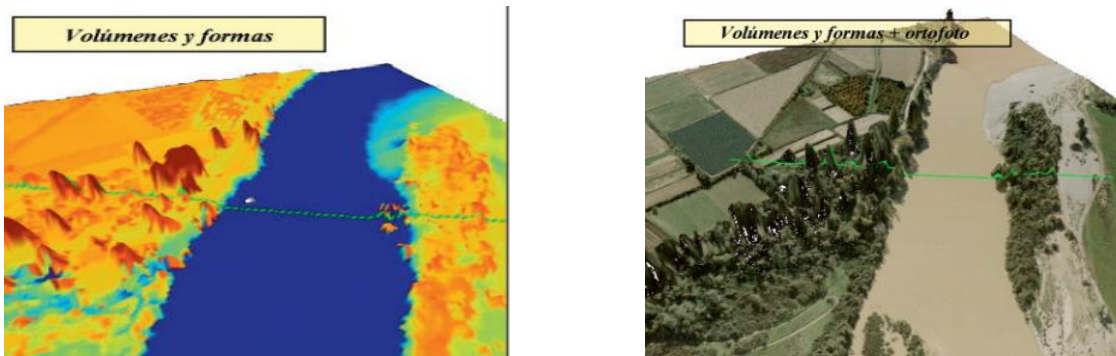
En las siguientes figuras se presentan los resultados de los modelos con datos LiDAR en distintas aplicaciones.

Figura 2

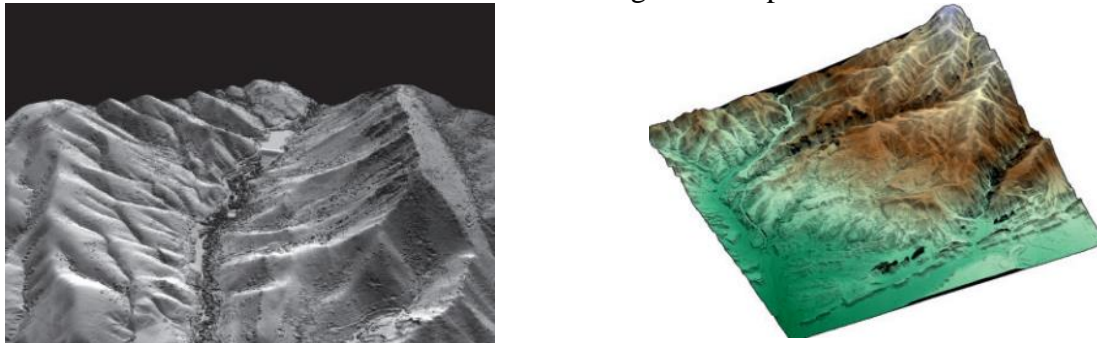
Aplicaciones LiDAR en caracterización y gestión del medio fluvial y forestal



Estudio de la evolución de meandros abandonados con datos LiDAR.



Aplicación de LiDAR al estudio de la estructura de vegetación riparia de un tramo del río Ebro.



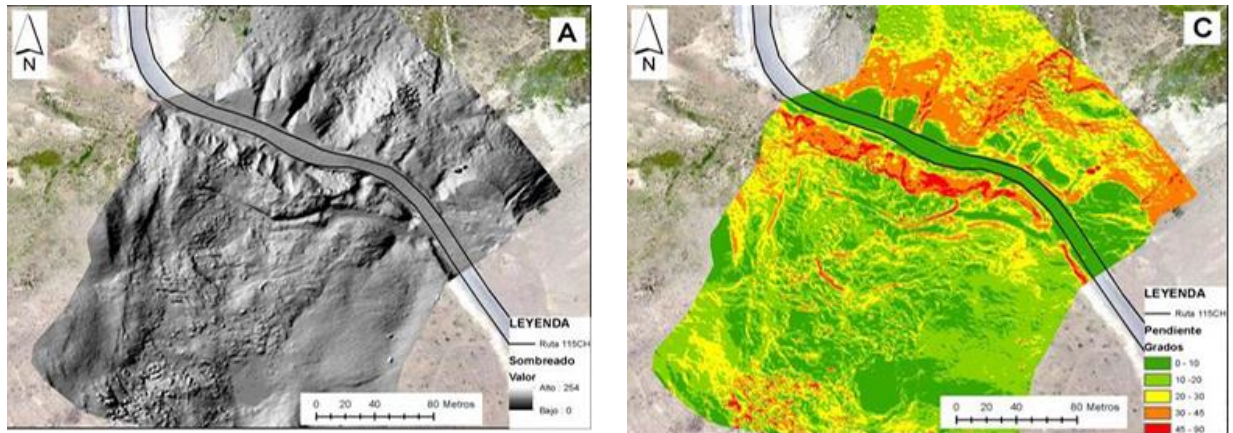
Modelos digitales creador para la gestión de cuencas hidrográficas a partir de datos LiDAR



Análisis de infraestructura mediante LiDAR.
Fuente: Magdaleno y Martínez (2006)

Figura 3

Aplicación LiDAR para fenómenos de remoción en masa



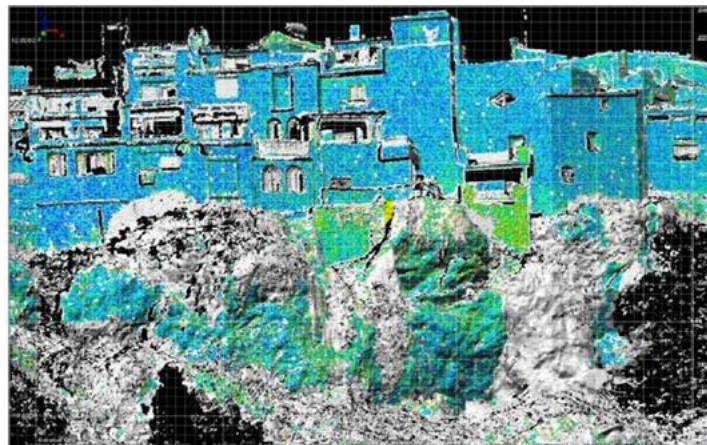
(A) Sombreado DEM LiDAR

(C) Pendiente LiDAR con ortofoto del deslizamiento rotacional sector Monjes Blancos.

Fuente: Becerra y Rurange (2021)

Figura 4

Monitorización de talud rocoso mediante datos LiDAR



Fuente: Galvis (2016)

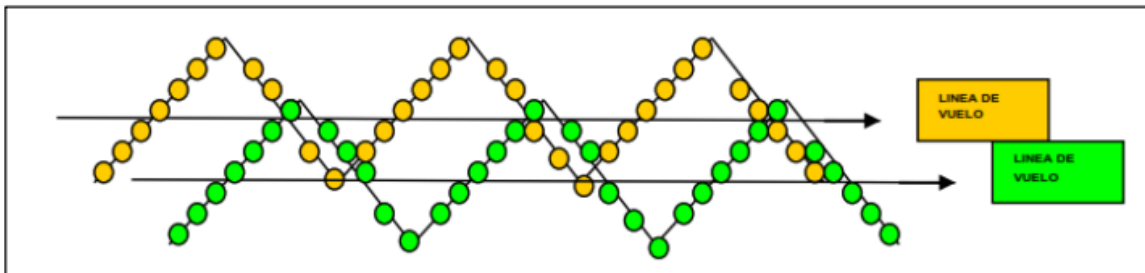
El valor de los datos LiDAR, cobran una gran ventaja cuando están combinados con otros datos como los de las fotografías aéreas, las imágenes satelitales o los datos topográficos. LiDAR provee información útil para todas las etapas de trabajos de infraestructura, tales como la planeación de un

corredor vial, simulaciones de impactos ambientales, movimientos óptimos de trabajos con tierra, determinación de la deformación de una vía y la detección de obstrucciones como la caída de los árboles después de una tormenta (Salamanca y Pérez, 2008).

1.4.2.1.7 Captura de puntos del Terreno. En el levantamiento LiDAR, el vuelo describe pasadas rectas y paralelas. El sensor LiDAR, mediante el escáner, va realizando medidas en oscilación perpendicular a la trayectoria, de forma que va midiendo distancias al suelo, de forma puntual, muy rápida (Soria, 2014). El esquema siguiente de trazado de línea quebrada proviene de la composición del movimiento rectilíneo de la trayectoria del avión con el movimiento oscilatorio del sensor. Cada uno de los círculos representa una “huella” (footprint) del láser, es decir el tamaño del cono que tiene como vértice el sensor. A partir del conglomerado de puntos aleatorios, formado por los puntos láser, el modelo digital de elevaciones se genera mediante un ráster por interpolación informática de puntos, que forma una matriz regular.

Figura 5

Disposición de una muestra de puntos sobre el terreno



Fuente: Soria (2014).

De cada disparo del láser se recibe: distancia al objeto, potencia de la señal y múltiples rebotes de la señal.

1.4.2.2 Generación de Modelos Digitales de Terreno (MDT). Un modelo digital del terreno (MDT) es la representación simplificada, en un formato accesible a los ordenadores, de la topografía del terreno (alturas sobre el nivel del mar) (Cebrian y Mark, 1986). Para ello se considera que las elevaciones forman una superficie tridimensional ondulada, en la que dos dimensiones se

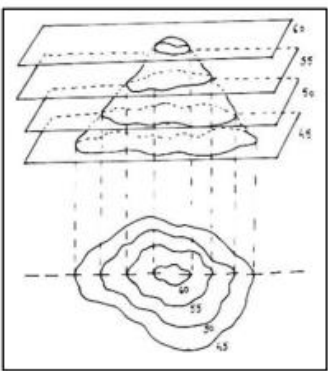
refieren a los ejes de un espacio plano (X e Y), y la tercera mide la “altura” (Z).

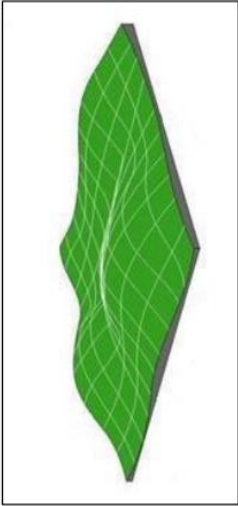
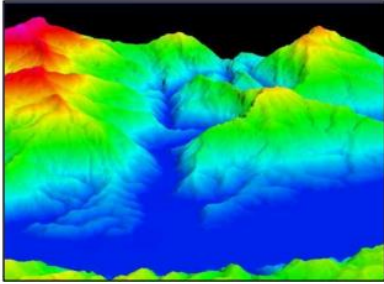
Los modelos de elevaciones pueden ser obtenidos mediante diferentes técnicas, como topografía clásica, restitución fotogramétrica, correlación. Hoy en día se impone cada vez con más fuerza el uso de modelos digitales del terreno obtenidos a partir de la técnica con láser aerotransportado (LiDAR - Light Detection and Ranging), ya que ofrece una serie de ventajas significativas respecto a las técnicas utilizadas tradicionalmente, destacando la precisión, fiabilidad, rentabilidad y la rapidez (Maceda, 2021).

Para obtener el modelo se forman grandes conjuntos de datos con las cotas o elevaciones del terreno que están asociadas con sus respectivas posiciones planimetrías, todo ese conjunto de datos conforman la base de datos digitales de elevaciones (Gómez et al., 2005). En la siguiente tabla se resumen las técnicas para obtener el MDT.

Tabla 4

Técnicas para obtención de MDT

Técnica	Descripción	Imagen
Por topografía clásica	La digitalización de la información sobre alturas contenida en el mapa topográfico forma una de las fuentes más importantes para la elaboración de un MDT. Lo único que es preciso digitalizar en este caso son las curvas de nivel y a veces las cotas de altitud puntuales. Estas curvas de nivel constituyen una fuente especialmente conveniente para generar un MDT. Su densidad varía del modo más adecuado para obtener una representación fidedigna del fenómeno de la altitud.	Representación de curvas de nivel topográfico. 

Técnica	Descripción	Imagen
Por restitución fotogramétrica	<p>Emplea un modelo estereoscópico de pares de fotografías aéreas del terreno (Arozarena, 1992). Para ello, y para otras funciones cartográficas, se han desarrollado dispositivos y aparatos que facilitan estas tareas y generan un fichero informático conteniendo una rejilla densa de puntos con tres valores numéricos, las coordenadas geográficas X e Y y la altura Z (Cebrián y Mark, 1986). En este caso, se puede decir que se cuenta ya con un MDT en formato ráster. No obstante, en ocasiones puede ser necesario hacer más densa aún la rejilla de puntos generada o realizar algún tipo de transformación y emplear procedimientos de interpolación.</p>	<p>Representación de un MDT en formato ráster</p> 
A partir de datos LiDAR	<p>Es una técnica madura y competente o complementa a otras técnicas de captura masiva como son la fotogrametría o el radar interferométrico.</p> <p>En una campaña LiDAR los productos habituales serán los puntos irregulares clasificados como pertenecientes al terreno o no y el modelo digital del terreno sin vegetación ni edificios. (Ruiz y Kornus, 2003).</p>	<p>Nube de puntos LiDAR ajustada al terreno. Vista 3D</p> 
Por correlación	<p>El MDT se consigue mediante extracción de puntos discretos de la imagen utilizando un operador de interés. Los puntos homólogos seleccionados se rebuscarán utilizando un algoritmo de intersección de líneas epipolares en</p>	

Técnica	Descripción	Imagen
	<p>imágenes con recubrimiento múltiple utilizando luego las ecuaciones de colinealidad. Conociendo las coordenadas imagen de los puntos y unos parámetros de orientación externa aproximados se podrán obtener las coordenadas X, Y, Z de los puntos seleccionados. De cada punto homólogo del primero localizado en una imagen permite plantearse dos ecuaciones, con tres incógnitas, las que serán las coordenadas terreno del punto. De estas, la Z es la que interesa para obtener el MDT. Si el punto escogido está situado en una zona Von Grüber, los puntos homólogos aparecerán en 6 imágenes como máximo, de esta manera se podrá plantear un ajuste por mínimos cuadrados para obtener las coordenadas terreno que se busca (Santos, 2005).</p>	

Fuente: Manceda (2021).

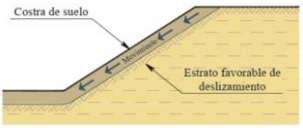
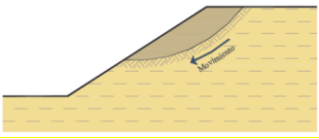
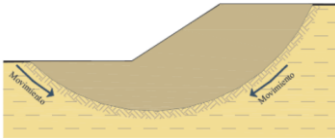

1.4.2.3 Talud en suelos. Se conoce como talud cualquier superficie inclinada respecto a la horizontal que adopten las estructuras de tierra (Jimenez y Rico, 1957), según la nomenclatura sugerida en el “*Special Report 247*” del *Transportation Research Board* en 1996, una masa de tierra no plana que presente cambios de altura significativos o pendientes puede denominarse con el nombre de talud o ladera, anotando que solo se consideran laderas aquellas inclinaciones de conformación natural y taludes las resultantes de actividades antrópicas.

Las laderas o taludes que han permanecido estables por muchos años, pueden fallar debido a cambios topográficos, sísmicos, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, la meteorización o a factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad (Suarez, 1998) y así convertirse en deslizamientos o fenómenos de remoción en masa.

1.4.2.3.1 Tipos de fallas de taludes. La masa de suelo que conforme un talud natural, terraplén o corte, tiende a desplazarse hacia abajo y al frente, debido a su propio peso. Cuando la resistencia al esfuerzo cortante del suelo contrarresta esa tendencia, el talud es estable; en caso contrario, se produce un deslizamiento.

Tabla 5

Tipos de fallas

Fallas en taludes	Descripción	Figura
<p>Falla por deslizamiento superficial</p>	<p>“Un proceso más o menos continuo y por lo general lento de deslizamiento ladera abajo que se presenta en la zona superficial de algunas laderas naturales” (Rico, 2000). El movimiento superficial se produce sin una transición brusca entre la parte superficial móvil y la masa inmóvil más profunda. No se presenta una superficie de falla definida</p>	
<p>Falla por rotación.</p>	<p>El deslizamiento ocurre abarcando una masa considerable de la profundidad del talud. En la mayoría de los casos no es una falla catastrófica.</p>	
<p>Falla por rotación.</p>	<p>El deslizamiento ocurre abarcando una masa considerable de la profundidad del talud. En la mayoría de los casos no es una falla catastrófica.</p>	
<p>Falla por traslación</p>	<p>Se presenta como un movimiento importante del cuerpo del talud sobre una superficie relativamente plana asociada a estratos poco</p>	

Fallas en taludes	Descripción	Figura
	resistente localizada en las cercanías del pie del talud. La superficie de falla se desarrolla paralela a la estratificación de suelos débiles, terminando generalmente sobre planos de agrietamientos verticales.	

Fuente: Estrada y Soberanis (2014).

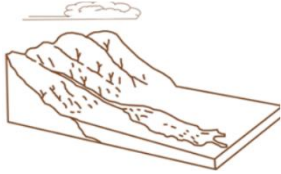
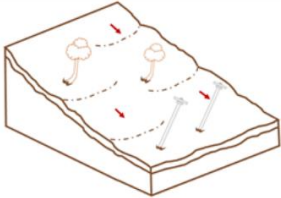
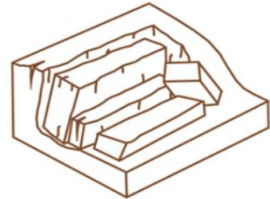
1.4.2.4 Movimientos en masa. Un movimiento en masa es todo movimiento ladero abajo de una masa de roca, de detritos o de tierra por efectos de la gravedad (Cruden, 1991). De acuerdo con García (1986) los movimientos del terreno más comunes en Colombia son caídas de rocas, deslizamiento traslacionales y rotacionales, flujos y movimientos combinados, además de procesos por desprendimiento de material asociados a la erosión.

Las diferentes formas de deslizamientos de tierra pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de material involucrado y el modo de movimiento que se producen (Varnes, 1958).

Tabla 6

Tipos de movimientos en masa

Tipo y descripción	Esquema
Deslizamiento rotacional: movimiento ladero abajo de una masa de suelo o roca a lo largo de un plano o superficie redondeada (cóncava hacia arriba) por donde se falla o quiebra el material.	
Deslizamiento traslacional: movimiento ladero abajo de una masa de suelo o roca a lo largo de un plano o superficie plana por donde se falla o quiebra el material.	
Caída de rocas: separación de una masa de roca o suelo desde una ladera empinada. El material desciende en caída libre, rebotando o	

Tipo y descripción	Esquema
rodando.	
<p>Flujos de lodo: la masa desplazada se asemeja a la masa de un líquido viscoso de acuerdo con el contenido de agua. Los flujos más rápidos corresponden a los flujos canalizados de detritos.</p>	
<p>Reptación: movimientos muy lentos de material superficial ladera abajo, generalmente afectan grandes áreas de terreno y no es fácil distinguir una superficie de falla. Terzaghi (1950) le asigna una tasa promedio de movimiento inferior a 30,48 cm por década.</p>	
<p>Volcamiento: rotación hacia delante sobre su eje inferior de una masa de roca o suelo en una ladera por acción de la gravedad, empuje de unidades adyacentes o por la presión de agua o hielo en las grietas de la masa (Cruden y Varnes 1996).</p>	

Fuente: Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD, 2021).

Existen diferentes factores que propician los movimientos en masa, pueden ser causas naturales o producto de la acción humana.

Tabla 7

Factores que propician los movimientos en masa

<p>Físico Naturales</p>	<p>Condiciones del terreno</p>	<p>Topografía</p>	<p>Los movimientos en masa ocurren con mayor frecuencia en terrenos caracterizados por presentar altas pendientes. En casos de obras lineales, abatir la pendiente de un talud o un correcto diseño incluyendo bermas intermedias puede ser suficiente para garantizar la estabilidad de este, es importante garantizar que la escorrentía tendrá un manejo adecuado para evitar la erosión.</p>
-----------------------------	------------------------------------	-------------------	--

Materiales débiles o sensibles	<p>Las características particulares de las rocas (composición, granulometría, estructura interna, grado de fracturamiento y descomposición), determinan su calidad o resistencia. De esta manera, todos los materiales tienen comportamientos diferentes y unos tienden a ser más susceptibles que otros al desarrollo de movimientos en masa.</p>	
Presencia de fallas geológicas	<p>Algunas fallas de taludes son provocadas por aspectos geológicos no detectados durante el levantamiento y exploración de campo, los cuales, al no ser considerados durante la evaluación de la estabilidad del talud, aumentan la incertidumbre del factor de seguridad calculado</p>	
Falta de cobertura vegetal	<p>La falta de cobertura vegetal es un fenómeno que ocasiona el movimiento en masa debido a que los árboles actúan como una “sombrija” la cual protege el suelo y evita que le llegue lluvia, además estos absorben el exceso de agua del subsuelo mediante sus raíces y posteriormente liberan el exceso de humedad por evapotranspiración, todo esto con el fin de evitar que el terreno se sature de agua</p>	
Procesos naturales	Lluvias intensas	<p>En épocas de invierno el suelo se satura de tal manera que aumenta su masa. Al introducirse agua en las grietas que presente el talud se origina un incremento en las fuerzas actuantes o</p>
	Lluvias prolongadas	<p>aparición de fuerzas de filtración, pudiendo provocar la falla del mismo</p>
	Ocurrencia de	<p>Los sismos suman fuerzas dinámicas a las fuerzas</p>

		sismos	estáticas actuantes a las que está sometido un talud, provocando esfuerzos cortantes dinámicos que reducen la resistencia al esfuerzo cortante, debilitando al suelo.
		Erosión o degradación del suelo	La capa superficial del suelo tiene contacto directo con el agua y el viento, el cual va generando un constante desgaste de dicha capa
		Erosión por acción del agua	
Acción humana	Procesos artificiales	Cortes y excavaciones en las laderas	Cuando se realiza una excavación al pie del talud, el esfuerzo total se disminuye, generando en el suelo un incremento negativo en la presión de poros. Cuando este incremento se disipa, puede presentarse la falla del talud al disminuir la resistencia al esfuerzo cortante del suelo.
		Sobre carga y rellenos en laderas	La aplicación de cargas sobre la corona del talud provoca un aumento en las fuerzas que actúan en la masa de suelo, lo cual, lo puede llevar a la falla si estas cargas no son controladas o tomadas en cuenta durante la evaluación de dicha estabilidad.
		Manejo de aguas	Los flujos de agua no controlados son los principales agentes detonantes de procesos de erosión y remoción en masa, por tanto, el inadecuado manejo del drenaje por carencia o deficiencia de obras para la captación y conducción de aguas superficiales, y la descarga de aguas residuales a media ladera, podrían propiciar la saturación del suelo y su pérdida de resistencia por aumento de presiones internas.
		Deforestación	La eliminación o falta de la cobertura vegetal en

las laderas por la quema, tala y remoción de la vegetación, favorece la infiltración del agua y el desarrollo de procesos erosivos, de ahí que aumente la probabilidad de falla del terreno por saturación y pérdida progresiva de suelo.

Fuente: Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER, 2022)

1.4.2.5 Análisis de estabilidad de taludes. El análisis de estabilidad de los taludes se puede llevar a cabo empleando diferentes metodologías, dada la complejidad de los problemas geotécnicos y la no linealidad de los suelos se han implementado soluciones simplificadas como es el caso de los métodos de equilibrio límite, los cuales se formulan para que cumplan las leyes de equilibrio, compatibilidad, leyes constitutiva y condiciones de borde (Bojorque, 2011), sin embargo, existen también métodos que tienen en cuenta la complejidad de los procesos y estudian la estabilidad de los taludes a través del análisis de elementos finitos como es el caso de los métodos numéricos (Bojorque, 2011).

1.4.2.5.1 Métodos de cálculo. Equilibrio Límite. Establece que la rotura del terreno se produce a través de una línea que representa la superficie fracturada. De esta forma, se interpreta que la masa de terreno por encima de dicha línea se desplaza respecto la masa inferior, produciéndose, así, el rompimiento del terreno. En el momento de producirse la rotura, la resistencia al corte a lo largo de la superficie de deslizamiento está movilizada, y el terreno se encuentra, en su totalidad, en equilibrio estático (Universitat Politècnica de Catalunya, s.f.).

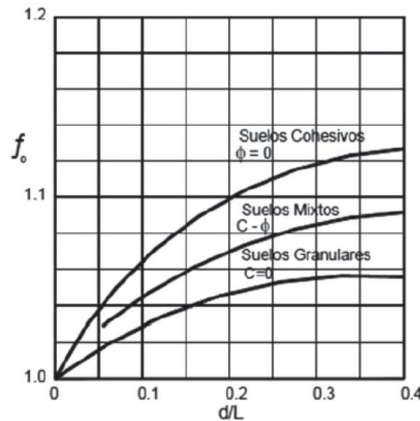
Los métodos de equilibrio límite comparan las fuerzas o momentos resistentes y actuantes sobre una determinada superficie de falla y calculan un factor de seguridad. Se pueden clasificar en dos grupos: (i) **Métodos exactos:** Aquí hay ausencia de deformaciones, factor de seguridad constante en toda la superficie de falla, solo es posible en taludes con geometría básica, como la rotura plana y rotura por cuñas y (ii) **Métodos no exactos:** En algunos casos el problema es hiperestático. Se pueden suponer así los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante, y los métodos de las dovelas. Los métodos de las dovelas o rebanas pueden clasificarse en dos grupos: (i) **Métodos aproximados:** No cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden citar por

ejemplo los métodos de Janbú, Fellenius y Bishop simplificado (Estrada y Soberanis, 2014) y (ii) **Métodos precisos o completos:** Cumplen todas las ecuaciones de a estática. Los más conocidos son los de Spencer, Bishop riguroso, entre otros. A continuación, se precisan los métodos aproximados.

- **Método de Janbú.** La principal consideración de este método es que las fuerzas entre dovelas son solo horizontales, no tomando en cuenta las fuerzas cortantes. A diferencia de los métodos anteriores, en este caso la SPF no debe ser obligatoriamente circular. Esto se refleja en la aplicación de un factor de corrección f_o , el que depende netamente del nivel de curvatura que presente la superficie de rotura (Sanhueza y Rodrigues, 2013).

Figura 6

Diagrama del factor f_o utilizado en el método de Janbú



Fuente: Estrada y Soberanis (2014).

Para determinar la estabilidad de un talud, Janbú considera el cálculo de un FS, el cual satisface el equilibrio de esfuerzos con la siguiente ecuación:

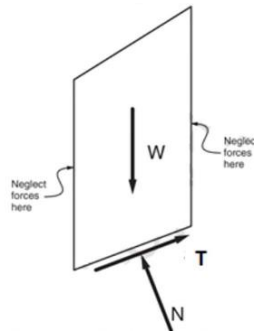
$$FS = \frac{f_o * \Sigma \left\{ [c * b + W * \tan(\phi)] * \frac{1}{\cos(\alpha) * m * a} \right\}}{\Sigma W * \tan(\alpha)}$$

- **Método de Fellenius.** Este método asume una superficie de falla circular Cuando la resistencia al corte τ_R considera un ángulo de fricción desigual a cero, es necesario conocer

el esfuerzo normal en la base de cada dovela; este método desprecia las fuerzas de interacción entre las dovelas vecinas dentro de una masa de suelo. En la siguiente figura se observan las fuerzas sobre la dovela para Fellenius (Sanhueza y Rodrigues, 2013).

Figura 7

Fuerzas sobre dovela para método de Fellenius



Fuente: Braja (2011).

De esta manera las fuerzas perpendiculares a la base de la dovela se tienen:

$$N = W \cos \alpha$$

El esfuerzo normal actuando sobre la base de la dovela se obtiene al dividir la fuerza normal (N) por el área de la base de la dovela (Δl)

$$\sigma = \frac{W \cos \alpha}{\Delta l}$$

Con esto se tiene que el factor de seguridad (FS) para esfuerzos totales es igual a:

$$FS = \frac{\sum(c * \Delta l + W \cos \alpha \tan \phi)}{\sum W \sin \alpha}$$

En este método de Fellenius también se considera un factor de seguridad para esfuerzos efectivos (σ'), considerando así el peso efectivo de la dovela

$$W' = W - u * b$$

Donde $u * b$ representa la subpresión debido a la presión de poros en la base de la dovela. Con esto se tiene

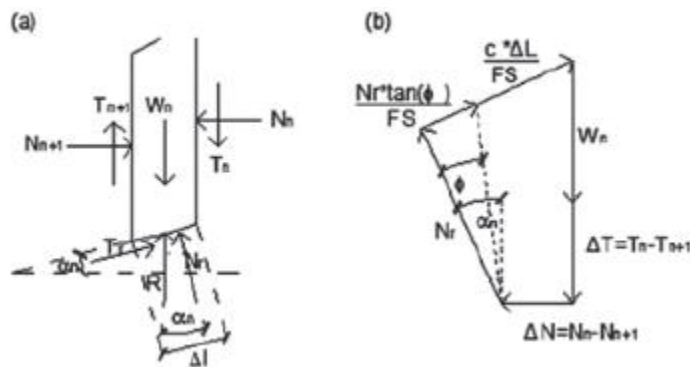
$$N' = W' \cos \alpha = W \cos \alpha - u * \Delta l * \cos^2 \alpha$$

$$FS = \frac{\sum [c' * \Delta l + (W \cos \alpha - u * \Delta l * \cos^2 \alpha) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha}$$

- **Método de Bishop simplificado.** El método propuesto por Bishop en 1955 analiza la estabilidad de un talud con SPF del tipo circular, tomando en cuenta el efecto de las fuerzas entre dovelas. Al tratarse de un Método de Dovelas, la masa de suelo deslizante debe ser dividida en η fajas verticales (a), de manera de estudiar las fuerzas (b) y momentos involucrados en cada una de las rebanadas definidas y determinar así el FS asociado al caso (Sanhueza y Rodrigues, 2013).

Figura 8

Método de Bishop simplificado



a) Esquema de las fuerzas que actúan en la dovela b) Diagrama de fuerzas en equilibrio de la η^{ma} dovela

Fuente: Geostru slope (s.f.).

Para las fuerzas perpendiculares a la base de la dovela se tiene que:

$$N \cos \alpha + T \sin \alpha - W = 0$$

La fuerza de corte (T) se relaciona con el esfuerzo de corte en la base de la dovela (τ) de la siguiente manera

$$T = \tau * \Delta l$$

Expresando τ en función de la envolvente de la resistencia y el factor de seguridad (condición de equilibrio) esto implica que:

$$T = \frac{\tau_R * \Delta l}{FS}$$

$$T = \frac{1}{FS} [c' * \Delta l + (N - u * \Delta l) \tan \phi']$$

Para N se tiene

$$N = \frac{W - \left(\frac{1}{FS}\right)(c' * \Delta l - u * \Delta l \tan \phi') \sin \alpha}{\cos \alpha + \frac{(\sin \alpha \tan \phi')}{FS}}$$

El esfuerzo normal efectivo se define como

$$\sigma' = \frac{N}{\Delta l} - u$$

Finalmente, el factor de seguridad en términos de esfuerzos efectivo sería así

$$FS = \frac{\sum \left[\frac{c' * \Delta l \cos \alpha + (W - u * \Delta l \cos \alpha) \tan \phi'}{\cos \alpha + \frac{(\sin \alpha \tan \phi')}{FS}} \right]}{\sum W \sin \alpha}$$

En términos totales $u = 0$.

- **Método de Spencer.** Spencer asume que la fuerza normal y de corte entre dovelas son paralelas e inclinadas a un ángulo θ respecto a la horizontal. Este método aplica para superficies circulares y no circulares ya que en el análisis se considera equilibrio de fuerzas (Aguilar y Zuñiga, 2015).

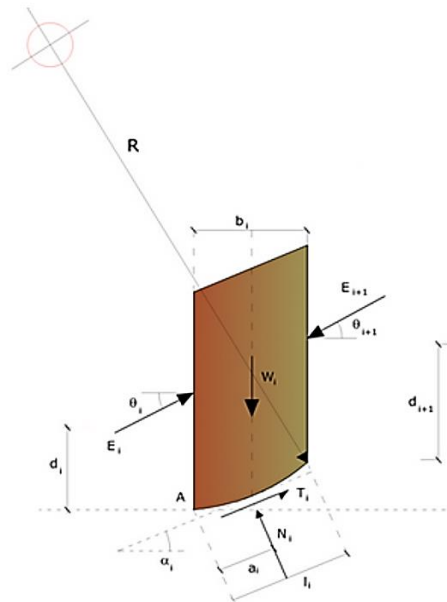
Spencer se basa en el supuesto de que las fuerzas de conexión a lo largo de las superficies de división de cada rebanada están orientadas paralelamente entre si e inclinadas con respecto a la horizontal según el ángulo θ , y que todos los momentos son nulos (Geostru slope, s.f.)

Estableciendo el equilibrio de momentos respecto al centro del arco por la superficie de deslizamiento se obtiene:

$$\sum Q_i R \cos(\alpha - \theta) = 0$$

Figura 9

Método de Spencer



Fuente: Geostru slope (s.f.)

Acciones sobre la i – ésima rebanada según la hipótesis de Spencer donde:

$$Q_i = \frac{\frac{C}{F_s} (W \cos \alpha - \gamma_w h l \sec \alpha) \frac{\operatorname{tg} \alpha}{F_s} - W \operatorname{sen} \alpha}{\cos(\alpha - \beta) \left[\frac{F_s + \operatorname{tg} \varphi * \operatorname{tg} (\alpha - \theta)}{F_s} \right]}$$

$$F = \frac{\{\sum [c_i \cdot b_i + (W_i - u_i \cdot b_i + \Delta X_i) \cdot \tan \varphi_i] \cdot \left[\frac{\sec \alpha_i}{(1 + \tan \alpha_i \cdot \tan \varphi_i / F)} \right]\}}{(\sum W_i \cdot \sin \alpha_i)}$$

Los valores de F y de ΔX que satisfacen esta ecuación dan una solución rigurosa al problema. Como primera aproximación conviene plantear $\Delta X = 0$ e iterar para el cálculo del factor de seguridad.

Como conclusión referente a los métodos, en la siguiente tabla se muestran los diferentes métodos de cálculo más utilizados, en el que se ha indicado la forma de resolver y calcular el factor de seguridad “FS”.

Tabla 8

Métodos más utilizados, para determinar FS

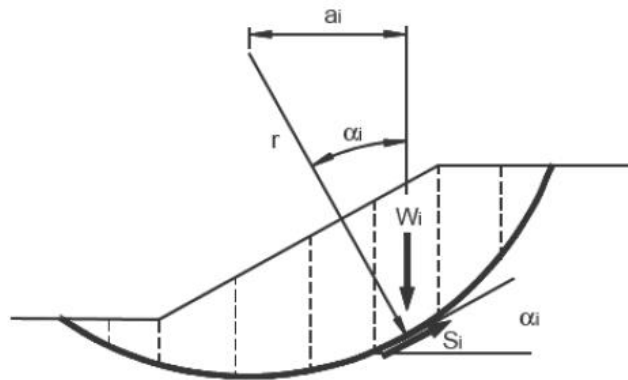
Método	1 dirección	2 direcciones	Equilibrio de momentos
Ordinario o de Fellenius	SI	NO	SI
Simplificado de Bishop	SI	NO	SI
Simplificado de Jambu	SI	SI	NO
Spencer	SI	SI	SI

1.4.2.6 Factor de seguridad. El factor de seguridad es empleado para conocer cuál es el factor de amenaza de que el talud falle en las peores condiciones de comportamiento para el cual se diseña (Suarez, 2021). El factor de seguridad en este caso se introduce como el valor que representa que tan alto o bajo es el grado de amenaza o la probabilidad de ocurrencia de la falla en el talud, a partir del tipo de superficie de falla y el método utilizado se puede definir como la resistencia a la corte

ofrecida por el talud sobre los esfuerzos que puedan generar la falla, o como los momentos resistentes disponibles y los momentos disponibles actuantes (Suarez, 1998).

Figura 10

Factor de seguridad



Fuente: Estrada y Soberanis (2014).

$$FS = \frac{\Sigma \text{Resistencias disponibles al cortante}}{\Sigma \text{Esfuerzos al cortante}}$$

$$FS = \frac{\Sigma \text{demomentos disponibles}}{\Sigma \text{momentos actuantes}}$$

El factor de seguridad se asume que es igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla, por lo tanto, este valor representa un promedio del valor total en toda la superficie de falla.

El factor de Seguridad Admisible, de acuerdo al título H (NSR-10) debe justificarse teniendo en cuenta: la magnitud de la obra, las consecuencias de una posible falla en la edificación o sus cimentaciones y la calidad de información disponible en materia de suelos

Tabla 9*Factores de seguridad mínimos-NSR colombiana-2012 H.2.4-1*

Condición	F_{SBM}		F_{SBUM}	
	Diseño	Construcción	Diseño	Construcción
Carga Muerta +Carga viva normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Carga Muerta+ Carga Viva Máx	1.25	1.10	1.40	1.15
Carga Muerta + Carga Viva Normal + Sismo de Diseño Seudo estático	1.10	1.00(*)	No se permite	No se permite
Taludes-Condición Estática y Agua Subterránea Normal	1.50	1.25	1.80	1.40
Taludes-Condición Estática y Agua Subterránea Normal y Coeficiente Sismo de Diseño	1.05	1.00(*)	No se permite	No se permite

Fuente: (NSR-10, 2012)

1.4.2.7 Investigación geotécnica. La investigación geotécnica tiene como propósito identificar las capas de depósito que subyacen a una estructura propuesta y sus características físicas se refieren generalmente como exploración del subsuelo. Es importante tener en cuenta el siguiente programa de investigación: recopilación información preliminar, reconocimiento Geológico de campo, planificación de exploración y muestreo, ejecución de la exploración y muestreo directo en campo, ejecución de ensayos de laboratorio.

1.4.2.7.1 Recopilación de información preliminar. Es importante realizar recopilación de información como el diseño estructural de construcciones de interés, información geológica y geomorfológica, topografía y relieve de la zona de estudio, información hidrológica, meteorológica y ambiental, sismicidad e información del uso de suelo.

1.4.2.7.2 Reconocimiento Geológico de campo. Tiene como objetivo lograr la interpretación del origen y formación de suelos, evaluación geológica, interpretación de posibles condiciones del subsuelo, topografía, huellas que indiquen presencia de nivel freático, aguas subterráneas, rondas

hídricas cercanas, tipos de construcción presentes en la zona, posibles zonas de inestabilidad geotécnica: taludes, excavaciones y cortes, áreas con presencia de grietas.

1.4.2.7.3 Planificación de exploración y muestreo. Permite ubicar y cuantificar el número de sondeos y optimizar el muestreo. La norma NSR-10, en el título H establece un número mínimo y profundidad de sondeos de acuerdo a la categoría de las unidades de construcción. En todos los casos el número mínimo de sondeos para un estudio será de 3 sondeos. Los sondeos con recuperación de muestras deben constituir como mínimo el 50% de los sondeos practicados en el estudio definitivo; En los sondeos con muestreo se deben tomar muestras cada metro en los primeros 5 m de profundidad y a partir de esta profundidad, en cada cambio de material o cada 1.5 m de longitud del sondeo; Al menos el 50% de los sondeos deben quedar ubicados dentro de la proyección sobre el terreno de las construcciones.

1.4.2.7.4 Ejecución de la exploración y muestreo directo en campo. Consiste en la ejecución de apiques, perforaciones, sondeos con muestreo, estáticos o dinámicos, u otros procedimientos exploratorios reconocidos en la práctica, con el fin de conocer y caracterizar el perfil del subsuelo afectado por el proyecto. Ejecutar pruebas directas o indirectas sobre los materiales encontrados y obtener muestras para la ejecución de ensayos de laboratorio.

1.4.2.7.5 Ejecución de ensayos de laboratorio. Permite determinar los parámetros de cada uno de los estratos del suelo. Ensayos en muestras alteradas. Límites de Atterberg: Límite Líquido - NTC1494, Límite Plástico e Índice Plástico -NTC1493.

Determinación del límite líquido de los suelos. Este ensayo se realiza para identificar el tipo de suelo en el que se va a trabajar, es usado principalmente para establecer correlaciones sobre su comportamiento ingenieril, como, la compactibilidad, la compresibilidad, la permeabilidad, los procesos de expansión y contracción, y también la resistencia al corte. Una función importante de este ensayo es que permite determinar la cantidad de materia orgánica del suelo (Normas y especificaciones 2012 INVIA, 2012).

Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. El método descrito en esta norma se debe

aplicar únicamente sobre la porción de suelo que pasa por el tamiz No.40. Este ensayo se debe realizar sobre el mismo material preparado para la determinación de límite líquido. El límite plástico, solo o en conjunto con el límite líquido y el índice de plasticidad, se usan con otras propiedades del suelo para establecer correlaciones sobre su comportamiento ingenieril, tales como la compresibilidad, la permeabilidad, la compactibilidad, los procesos de expansión y contracción y la resistencia al corte.

Los límites líquido y plástico de un suelo, junto con su contenido de agua, se usan para expresar su consistencia relativa o índice de liquidez. Además, el índice de plasticidad, junto con el porcentaje de partículas menores de $2 \mu m$, permite estimar la actividad de la fracción de un suelo.

Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD). Esta norma tiene como objeto establecer el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, empleando el método de corte directo. La prueba se lleva a cabo deformando una muestra a velocidad controlada, cerca de un plano de corte determinado por la configuración del aparato de ensayo. Los esfuerzos de corte y los desplazamientos no se distribuyen uniformemente dentro de la muestra y no se puede definir una altura apropiada para el cálculo de las deformaciones por corte.

Envolvente de falla. El círculo de Mohr se utiliza para representar o describir la resistencia al cortante de los suelos, utilizando la envolvente de falla Mohr – Coulomb, lo cual equivale a que una combinación crítica de esfuerzos que se ha alcanzado. La envolvente de falla Mohr - Coulomb es generalmente una línea curva que puede representarse en la forma:

$$s = A (\sigma')^b$$

Donde:

S = Resistencia al cortante

σ' = Esfuerzo normal efectivo

A y b = Constantes (Estrada y Soberanis, 2014).

1.4.2.8 Resistencia al Esfuerzo cortante. La modelación o representación matemática del fenómeno de falla al cortante en un deslizamiento se realiza utilizando las teorías de la resistencia de materiales. Los suelos al fallar al corte se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación generalizada de Coulomb:

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi'$$

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \phi' + (\mu - \mu_a) \tan \phi''$$

Donde:

τ = Esfuerzo de resistencia al corte

c' = Cohesión o cementación efectiva

σ = Esfuerzo normal total

μ = Presión del agua intersticial o de poros

μ_a = Presión del aire intersticial

ϕ' = Angulo de fricción interna del material

ϕ'' = Angulo de fricción del material no saturado

El análisis de la ecuación de Coulomb requiere predefinir los parámetros, ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo.

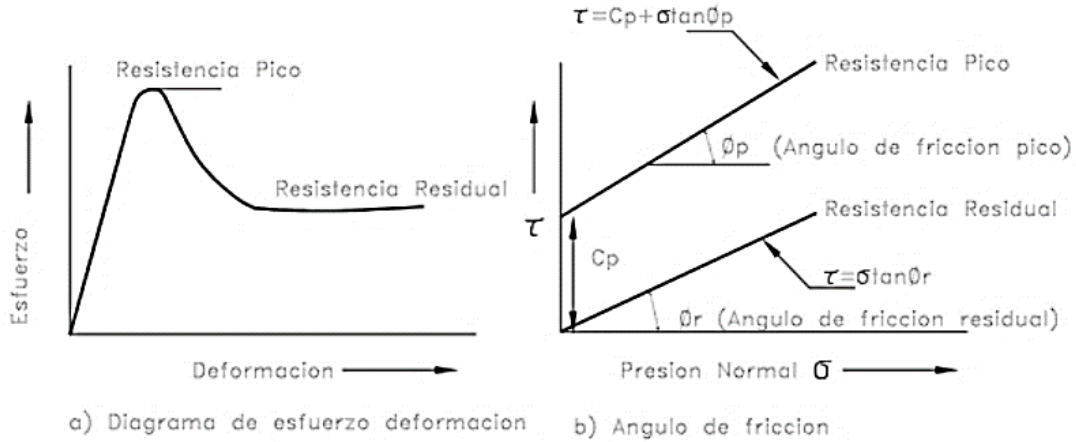
- **Angulo de fricción:** El ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento. Depende de varios factores como lo son, la forma, la distribución de los granos, el tamaño de los mismos y la densidad (Bilz, 1995).
- **Cohesión:** La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión. En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a

0 y a estos suelos se les denomina Suelos no Cohesivos o de naturaleza friccionante (Estrada y Soberanis, 2014).

- **Cohesión aparente:** En los suelos no saturados el agua en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares. Esta cohesión aparente desaparece con la saturación.
- **Concepto de esfuerzo efectivo:** Los esfuerzos ejercidos por el esqueleto solamente, se conocen como esfuerzos efectivos y los esfuerzos hidrostáticos del agua se les denominan presión de poros. Los esfuerzos efectivos controlan el comportamiento del suelo y no los esfuerzos totales. Desde el punto de vista de la relación esfuerzo – deformación, en estabilidad de taludes se deben tener en cuenta dos tipos de resistencia:
 - **Resistencia máxima o resistencia pico:** Es la resistencia al corte máxima que posee el material que no ha sido fallado previamente, la cual corresponde al punto más alto en la curva esfuerzo - deformación. La utilización de esta en el análisis de estabilidad asume que la resistencia pico se obtiene simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla.
 - **Resistencia residual:** Es la resistencia al corte que posee el material después de haber ocurrido la falla. Skempton (1964) observó que en arcillas sobreconsolidadas, la resistencia calculada del análisis de deslizamientos después de ocurridos, correspondía al valor de la resistencia residual y recomendó utilizar para el cálculo de factores de seguridad, los valores de los parámetros obtenidos para la resistencia residual ϕ_r y Cr. Otro factor que determina las diferencias entre la resistencia pico y residual es la sensibilidad, la cual está relacionada con la pérdida de resistencia por el remoldeo o la reorientación de las partículas de arcilla (Estrada y Soberanis, 2014).

Figura 11

Resistencias pico y residual



Fuente: Estrada y Soberanis (2014).

- **Parámetros de presión de poros.** El análisis de esfuerzos efectivos requiere del conocimiento de las presiones de poro en el campo. Estas presiones de poro pueden ser estimadas si los cambios de Esfuerzo dentro del suelo se pueden determinar. Para esta estimación se pueden utilizar los parámetros de presión de poros A y B propuestos por Skempton (1954) para calcular las presiones de poro en exceso.

$$\Delta_u = B[\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)]$$

Donde:

Δ_u = Exceso de presión de poros

A = Parámetro de presión de poros A

B = Parámetro de presión de poros B

$\Delta\sigma_1$ = Cambio en el esfuerzo principal mayor

$\Delta\sigma_3$ = Cambio en el esfuerzo principal menor

Para suelos saturados B se acerca a 1.0 pero su valor disminuye drásticamente con la disminución en el grado de saturación. Los valores del parámetro A dependen de las deformaciones

y generalmente, la tabla 11 muestra valores típicos de parámetro A en el momento de la falla (Estrada y Soberanis, 2014).

Tabla 10

Valores típicos del parámetro A

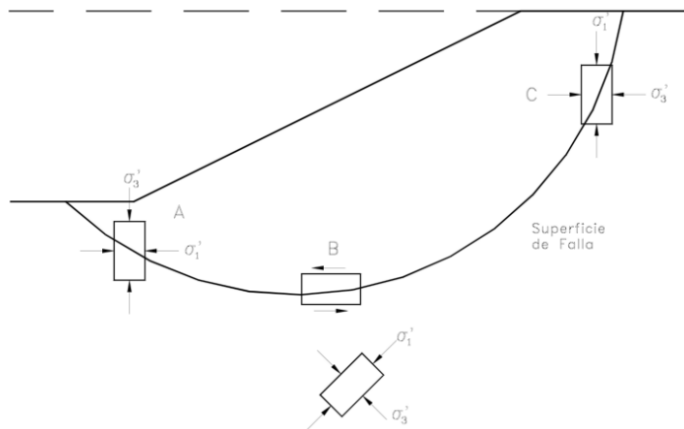
Tipo de Arcilla	Valor del parámetro A de Skempton
Altamente sensitiva	0.75 a 1.5
Normalmente consolidada	0.5 a 1.0
Arcilla arenosa compactada	0.25 a 0.75
Arcilla ligeramente sobreconsolidada	0.0 a 0.5
Arcillas gravosas compactadas	-0.25 a + 0.25
Arcillas muy sobreconsolidadas	-0.5 a 0.0

Fuente: Estrada y Soberanis (2014).

El valor de A está muy influenciado por el nivel al cual el suelo ha sido previamente deformado, el esfuerzo inicial del suelo, la historia de esfuerzos y la trayectoria de esfuerzos, tales como carga y descarga (Lambe y Whitman, 1969).

Figura 12

Dirección de esfuerzos principales en la falla de un talud



Fuente: Estrada y Soberanis (2014).

1.4.2.8.1 Circulo de Mohr. En este círculo se definen los valores de σ máximo (σ_1) y σ mínimo (σ_3), conocidos como Esfuerzos principales. Para interpretar correctamente el fenómeno de falla al cortante en un talud debe tenerse en cuenta cuál es la dirección de los esfuerzos principales en cada sitio de la superficie de falla. El esfuerzo σ_1 es vertical en la parte superior de la falla y horizontal en la parte inferior.

1.4.2.9 Software de modelación. Para el análisis de estabilidad de talud existen diferentes softwares que permiten realizar de una manera rápida y más precisa la evaluación del factor de seguridad, estos softwares permiten aplicar diferentes métodos, entre ellos el de equilibrio límite, que abarca las teorías de Fellenius, Bishop, Spencer y Janbú. Teniendo en cuenta lo anteriores a continuación se presentan los 3 programas utilizados en dicho análisis.

1.4.2.9.1 Slide 2D. Es un software de análisis de taludes en 2D que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de la estabilidad. Su ámbito de aplicación en obras civiles es muy variado, permitiendo evaluar un gran número de problemáticas geotécnicas, tales como estabilidad de terraplenes, presas, taludes en excavaciones mineras o en edificaciones, efectos de cargas externas, sísmicas, etc. (Geologos, 2016).

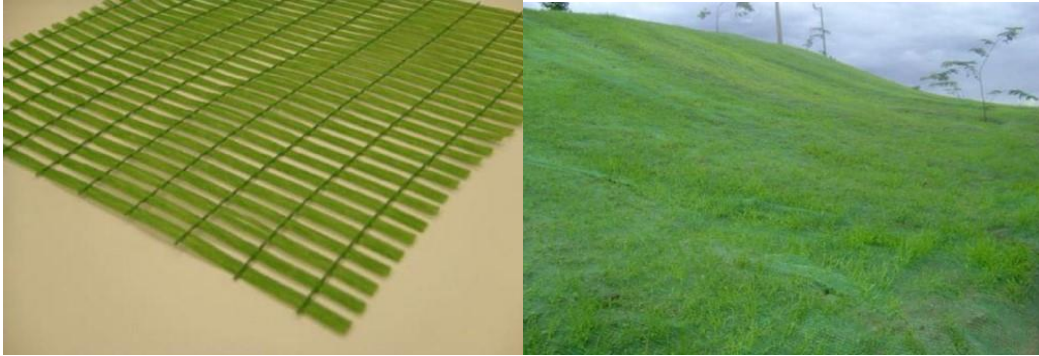
Este software es de fácil manejo para el análisis de estabilidad de taludes; en su interfaz inicial llamado Project Settings solicita parámetros o alineamientos básicos como por ejemplo la dirección de falla, unidades, métodos de análisis método de agua subterránea, es aquí donde se define los parámetros para dicho análisis de manera más rápida a diferencia de otros programas.

1.4.2.10 Medidas de mitigación (Mantos).

1.4.2.10.1. Manto temporal BIOTEX. Es un manto ecológico de tejido abierto, diseñado para control de erosión y soporte de la vegetación, fabricado con fibras PET de foto degradación con el medio ambiente, las principales características es que son elementos transversales texturizados que transportan agua por capilaridad, aloja agua en sus fibras preservando la humedad en la superficie del suelo, tiene una estructura de malla abierta, y su foto degradación es lenta (Geomatrix, 2017).

Figura 13

Manto temporal BIOTEX



Fuente: Geomatrix (2017).

1.4.2.10.2 Manto permanente ABSORMAT. Es un manto con una alta capacidad de retención de humedad, diseñado para controlar la erosión aportando soporte mecánico y retención de humedad para el establecimiento de la vegetación, su duración es superior a 6 años, puede ser usado en la protección de erosión de terraplenes viales.

Figura 14

Manto permanente ABSORMAT



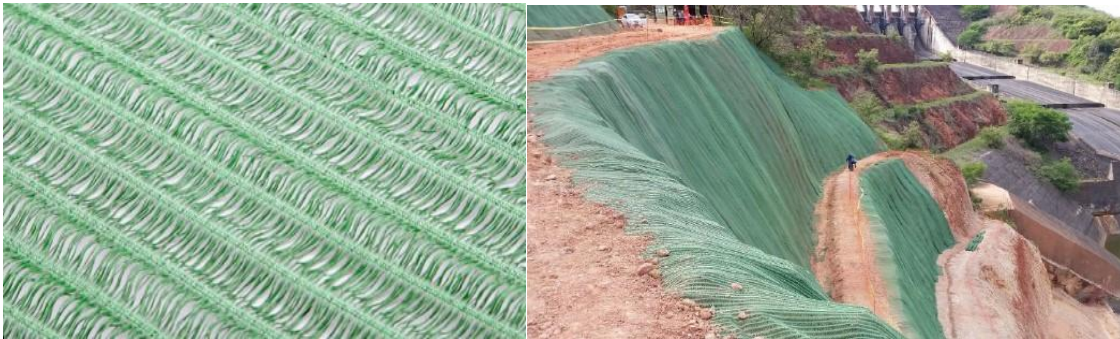
Fuente: Geomatrix (2017).

1.4.2.10.3 Terratrac TRM 15, taludes con inclinación. Protege la superficie del suelo ante esfuerzos cortantes causados por acción de flujo de agua y a su vez proporciona un soporte estructural para la vegetación en establecimiento y un refuerzo permanente para la vegetación

madura. Es un manto permanente a largo plazo diseñado con el fin de brindar protección inmediata contra la erosión, servir de soporte en el establecimiento y crecimiento de la vegetación madura. Es utilizado como protección contra la erosión de taludes y canales, no posee efectos adversos sobre el entorno, pues está conformado por materiales inertes. Se fabrica con fibras sintéticas de poliéster resistentes a la luz UV que conforman una matriz tridimensional porosa., es altamente resistente a la tensión, enrollable y de fácil instalación. Su duración es superior a 15 años (Geomatrix, 2017).

Figura 15

Terratrac TRM



Fuente: Geomatrix (2017).

Figura 16

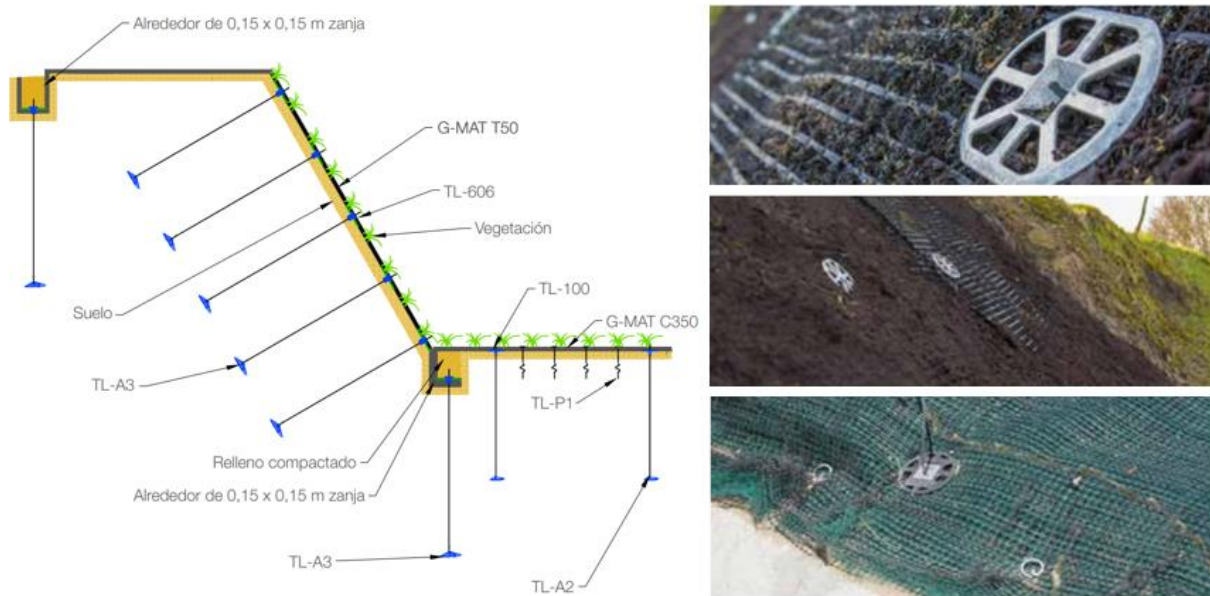
Mantos TRM 15



Fuente: Geomatrix (2017).

1.4.2.10.5 Anclajes tipo GRIPPLE. Es un anclaje autosellante que aporta seguridad a las geomembranas, porque evita que se muevan en las aplicaciones de elevación y descenso, sus características más favorables son: ahorro de tiempo y costos, soluciones estéticas para entonos verdes, sistema ligero que minimiza los problemas de salud y seguridad, reducciones considerables del embalaje (Gripple, 2023).

Figura 17
Anclajes tipo gripple



Fuente: GRIPPLE (2020).

1.4.3 Marco contextual

La evaluación de la tecnología LiDAR para el análisis de estabilidad de taludes, se realizó en la Universidad Mariana la cual está ubicada en la calle 18 número 34-104 del municipio de Pasto, departamento de Nariño, Colombia.

Pasto, es una ciudad del sur occidente colombiano, con una población superior a los 400000 habitantes y capital del Departamento de Nariño. Es una de las ciudades más antiguas del país, se encuentra ubicada en el Valle de Atríz, en medio de la cordillera de los Andes en el macizo

montañoso denominado Nudo de los Pastos al pie del Volcán Galeras (Alcaldía de Pasto, 2020).

La Universidad Mariana, es una universidad privada, católica, cuenta con 5 facultades que ofrece 23 programas de pregrado y desde el 2022 cuenta con una acreditación en alta calidad la cual fue otorgada por el Ministerio de Educación Nacional a través de la resolución 014045 del 19 julio del año 2022 (Mariana, 2022).

Figura 18

Ubicación Universidad Mariana



1.4.4 Marco legal

Para el desarrollo de la presente investigación se tuvo en cuenta la siguiente normativa

Tabla 11*Normativas para análisis de taludes*

Normativa	Título
NSR-10 Título H	Estudios geotécnicos.
NTC 1528	Suelos. Ensayos para determinar la granulometría por tamizado.
NTC 1495	Ensayo para determinar el contenido de humedad (ASTM D 2216)
I.N.V E-104	Toma de muestras inalteradas en suelo en superficie.
I.N.V E-125	Determinación de limite liquido de suelos.
NTC 1494	Ensayo para determinar el límite liquido (ASTM D4318)
I.N.V E-126	Limite plástico e índice de plasticidad de suelos.
NTC 1493	Ensayo para determinar el límite plástico y el índice de plasticidad (ASTM D4318)
I.N.N E-154	Ensayo de corte directo en condición consolidada

1.5 Metodología

1.5.1 Campo de investigación

Considerando las áreas de conocimiento de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, OCDE, la presente investigación se enmarca en el área de Ingeniería y Tecnología, subárea de ingeniería civil y disciplina de ingeniería de la construcción.

1.5.2 Enfoque o tipo de investigación

El enfoque de la investigación es mixto, ya que involucra operaciones numéricas para el análisis de estabilidad del talud y además se realiza una comparación entre los diferentes métodos de levantamiento topográfico.

1.5.3 Tipo de investigación

La presente investigación corresponde a una investigación analítica, ya que se pretende evaluar diferentes técnicas de medición topográficas y analizar la estabilidad de un talud.

1.5.4 Diseño de la metodología

A continuación, se presenta la matriz de planeación y ejecución del trabajo de grado.

Tabla 12

Diseño de la metodología

Título de la investigación					
Evaluación de tecnología LiDAR para el análisis de estabilidad de taludes, caso de estudio Universidad Mariana del Municipio de Pasto- Nariño					
Objetivo general					
Evaluar la tecnología LiDAR para analizar la estabilidad de un talud localizado en la sede principal de la Universidad Mariana.					
Esquema metodológico					
Objetivos específicos	Meta	Estrategia de trabajo	Actividades	Productos esperados	
Revisar de manera sistemática la información del sitio de estudio para caracterizar la zona y la tecnología aplicar creación	Identificar aspectos geológico-geotécnicos de la zona de estudio y reconocer tecnología LiDAR emplear.	Clasificación de información existente. Programación de estudios y levantamientos topográficos con estación LiDAR.	-Reconocimiento del sitio de estudio. -Recopilación de información. -Revisión y clasificación de información. -Realizar estudios	Aspectos geológicos y geotécnicos identificados y analizados del sitio de estudio. Reconocimiento de la tecnología LiDAR.	

MDT.					suelos.	
Comparar los modelos de elevación digital del terreno con diferentes metodologías.	Realizar el Modelo Digital del terreno con datos LiDAR y con datos de topografía convencional para compararlos	Realizar el Modelo Digital del terreno con datos LiDAR y con datos de topografía convencional para compararlos	Levantamiento de topografía		-Efectuar el levantamiento topográfico convencional con LiDAR. -Procesar la información.	Modelos digitales del terreno con datos LiDAR y con datos de topografía convencional.
Realizar el análisis de estabilidad talud por método de elementos finitos usando el modelo de datos LiDAR.	Determinar el factor de seguridad del talud.	Determinar el factor de seguridad del talud.	A través del software de elementos finitos SLIDE se determinará el factor de seguridad		-Manejo de la interfaz del programa. -Cargar datos al software. -Interpretar los resultados.	Valor de factor de seguridad del talud.

2. Presentación y análisis de resultados

En el siguiente apartado se presentan los resultados de cada objetivo específico; se retoma la metodología empleada para el logro de cada uno, las respectivas fuentes de información, la sistematización de la misma y posterior a ellos se indica el análisis respectivo.

2.1 Procesamiento de la información y análisis de resultados objetivo 1

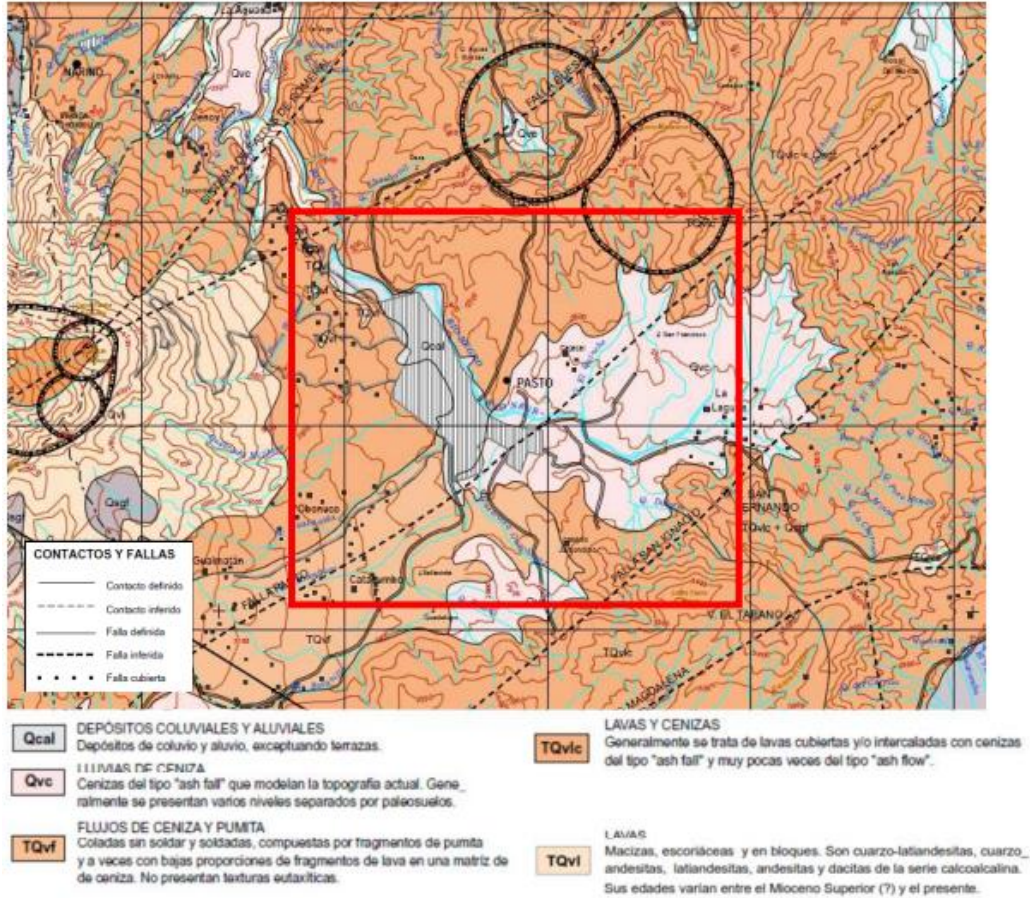
El primer objetivo específico corresponde a: “revisar de manera sistemática la información del sitio de estudio para caracterizar la zona y la tecnología a emplear para levantamiento topográfico”. Una vez revisada la información disponible del Servicio Geológico Colombiano, documentos públicos del Municipio como el Plan de Ordenamiento Territorial, el Plan Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres e información facilitada por la Comunidad de Hermanas Franciscanas se presenta las siguientes características geológicas de la zona de estudio.

2.1.1 Marco geológico de la zona de estudio

De acuerdo al mapa geológico presentado por la plancha 429 con una escala 1:100.000, la zona de estudio del municipio de Pasto, enmarcada con una línea roja, está compuesta principalmente por depósitos coluviales y aluviales en su parte central (Qcal), con lluvias de ceniza (Qvc), flujos de ceniza y pumita (Tqvf) y lavas y cenizas (TQvlc) en las zonas circundantes o correspondientes al perímetro de la ciudad de Pasto. Esta zona está atravesada por la falla San Ignacio al suroriente, la falla Pasto al centro y la falla Buesaco al noroccidente. Además, la región está influenciada por otras fallas activas como es el caso del sistema Romeral (SGC, 2015).

Figura 19

Composición geológica escala 1:100.000 municipio de Pasto

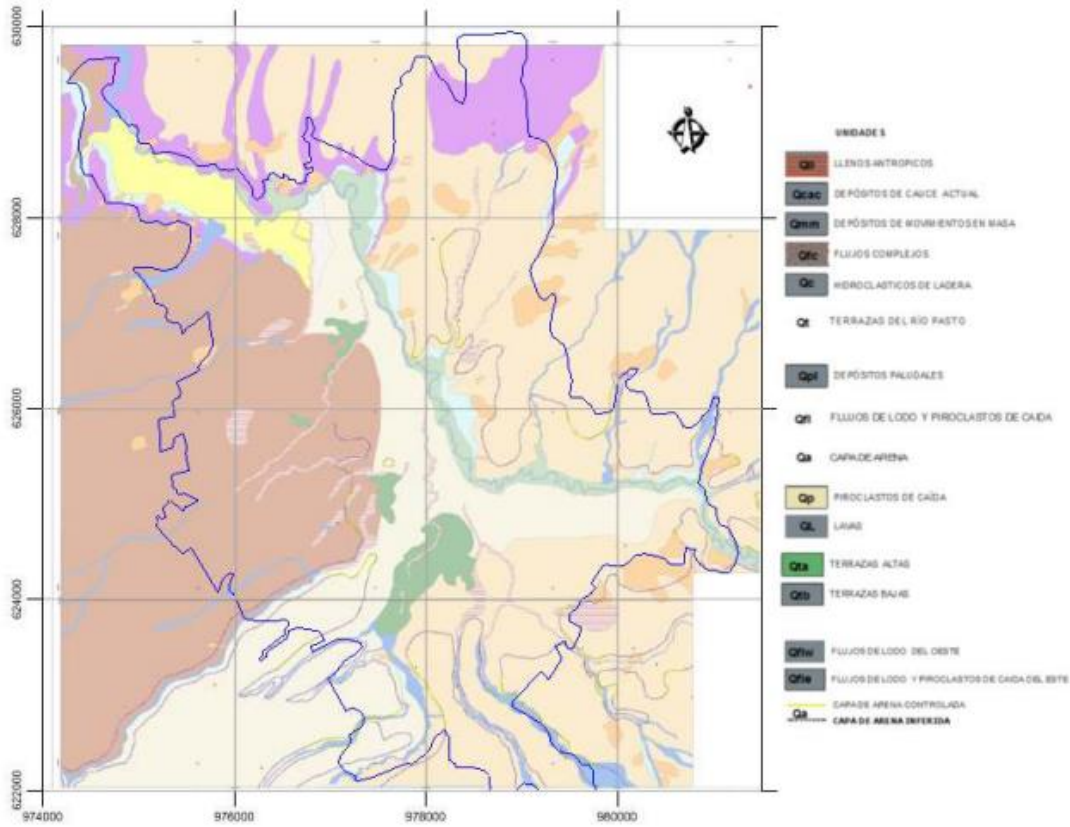


Fuente: (SGC, 2015)

De acuerdo al estudio de evaluación de efectos actuales de subsidencia y colapsos por aprovechamiento subterráneo de recursos minerales en la ciudad de San Juan de Pasto” (Carrillo et al., 2003), se cuenta con una caracterización geológica de la zona urbana de la ciudad de Pasto con una escala 1:10.000. Se determinaron 12 UGS correspondientes al sustrato ingenieril, generadas principalmente por actividad volcánica, flujos sedimentarios y rellenos antrópicos.

Figura 20

Mapa de unidades geológicas superficiales de Pasto escala 1:10.000



Fuente: (SGC, 2015).

2.1.2 Geología estructural

De acuerdo a lo dispuesto en el documento de memoria explicativa, mapa geomorfológico aplicado a movimientos en masa de la plancha 429-Pasto, el régimen tectónico está relacionado con la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa suramericana, esta zona se encuentra localizada en el denominado nudo de los pastos donde confluyen las tres cordilleras oriental, central y occidental, por lo tanto, es una zona muy importante estructuralmente.

En esta zona se encuentran grandes sistemas de fallas tales como: Falla Cauca-Patia, sistema de fallas romeral, falla de Buesaco, falla Patia-Guaitara, falla de manchabajoy, sistema de fallas afiladores entre otras (Alcaldia de Pasto, 2015), que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 13

Sistemas de Fallas municipio de Pasto.

Falla	Descripción
Falla frontal de la Cordillera Oriental.	De tipo compresional, localizada en la margen oriental de la Cordillera Oriental.
Sistema de fallas de Romeral	Localizada en el flanco occidental de la cordillera centro-oriental, en orientación N45°E - N10°E, es una de las estructuras de mayor importancia tectónica del país. Su trazo principal pasa por el volcán Galeras y continúa por el río Guáitara; este sistema de fallas presenta una alta actividad sísmica e incluye la Falla de Buesaco, Falla de Pasto, Falla de Tescual, Falla Manchabajoy y Falla de San Ignacio.
Falla de Afiladores.	Posee una dirección norte - sur al costado izquierdo de la Cocha, hacia el sur ejerce un control tectónico sobre la Laguna de la Cocha. También pasa con rumbo este – oeste hasta la Laguna Negra y se prolonga hasta el páramo de Bordoncillo.
Sistema de fallas del Rio Magdalena	Tiene una dirección este – oeste y se encuentra localizada al norte de la Laguna de la Cocha, atraviesa las formaciones de El Tábano y Bordoncillo.
Falla del Guamués	Descrita como una falla activa con una dirección N 45° W, coincidiendo con el cauce del río Guamués y prolongándose al sureste. La falla parece inducir fracturas en los depósitos cuaternarios del Guamués.
Fallas locales.	Se encuentran tres fallas activas que confluyen en la cuenca del río Miraflores sobre los 2620 msnm. La falla de Afiladores que pasa en la cuenca con rumbo este – oeste hasta Laguna Negra y de prolonga hasta el páramo de Bordoncillo; la falla de Pasto que en la cuenca del río Miraflores toma tres rumbos pasando su área de influencia por la ciudad de Pasto y su periferia; la falla de Tescual que tiene un trazado desde el río Bobo en dirección sur – norte en dirección a la zona urbana de Pasto.

Fuente: Alcaldía de Pasto (2015).

2.1.3 Hidrología y geomorfología

El sistema hídrico del municipio de Pasto está conformado por la cuenca alta del río Pasto, río Bobo y Guamués (Lago Guamués, río El Estero, Río Alisales y Corrientes directas alto Guamués).

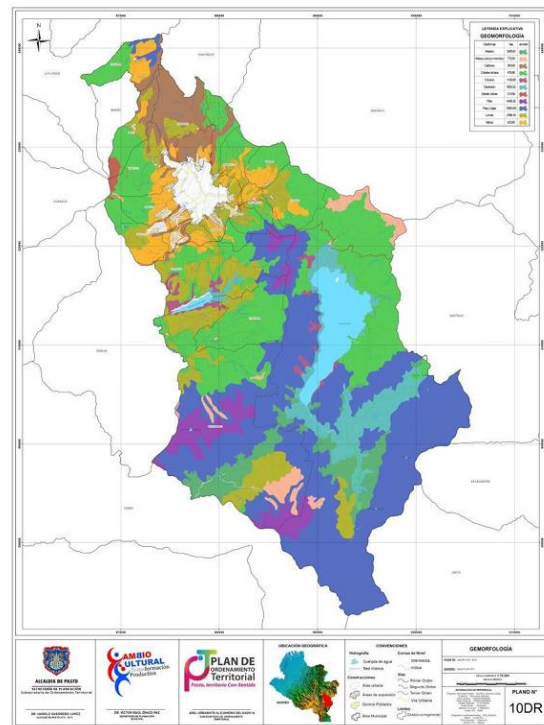
En cuanto a la geomorfología, las rocas eruptivas provenientes de la actividad volcánica de fines del terciario y del cuaternario ocupan la totalidad del territorio del municipio de Pasto y en su formación han moldeado la topografía dando origen a terrazas fluviovolcánicas, valles en V y escarpes (Alcaldía de Pasto, 2015).

Dentro de la geomorfología del municipio de Pasto se tienen: abanicos, cañones, artesa y campo morreico, estrato volcán, coladas de lava, coluvios, filas, depresión, lomas, mesas, distribuidos como se indica en la siguiente tabla.

Figura 21

Geomorfología municipio de Pasto

Geoforma	Área (has)
Abanicos	3245.81
Aretesa y campo morreico	772.83
Cañones	363.93
Coladas de lava	476.96
Coluvios	1145.59
Depresión	5902.22
Estrato Volcán	313.59
Filas	446.42
Lomas	2798.96
Mesas	432.85



Fuente: Alcaldía de Pasto (2015).

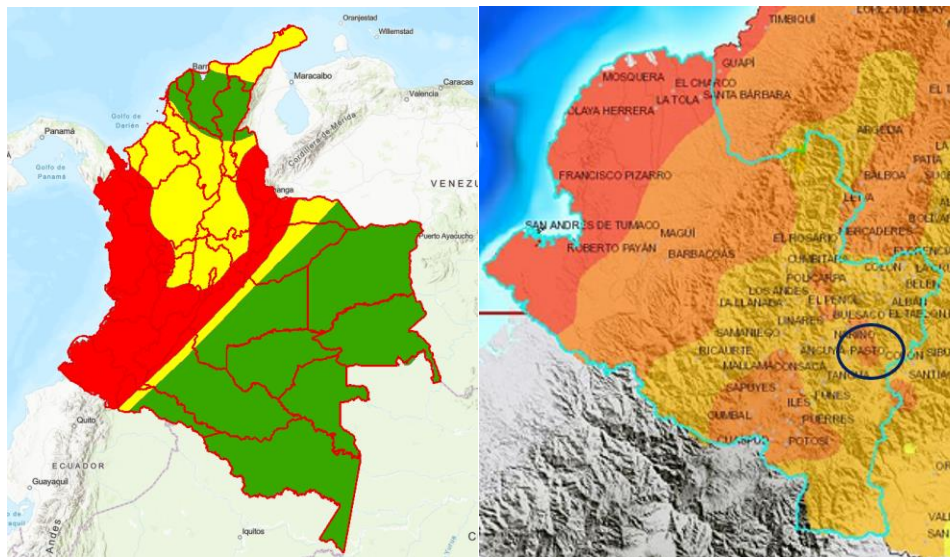
2.1.4 Sismicidad

Colombia se encuentra ubicada al noroccidente de continente suramericano, localizada en una zona de alta complejidad geológica debido a que es el resultado de la interacción de tres placas tectónicas principales, las placas suramericanas, Nazca y Caribe. Esta situación determina un territorio caracterizado por cadenas montañosas jóvenes que favorecen la ocurrencia de sismos y erupciones volcánicas (Alcaldía de Pasto, 2013).

El Departamento de Nariño se ubica, de acuerdo a lo dispuesto en el Reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR-10, en zona de amenaza Alta, de igual manera el municipio de Pasto como se observa en la siguiente figura.

Figura 22

Zonas de amenaza sísmica departamento de Nariño

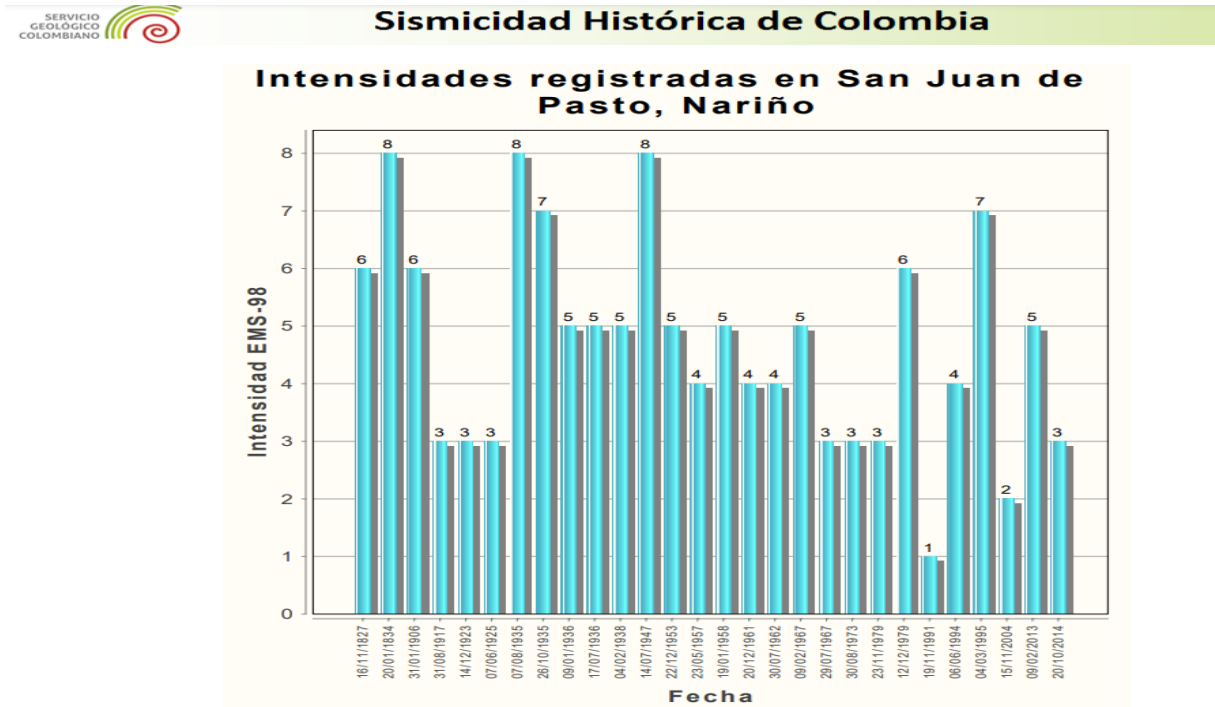


Fuente: SGC (2023).

De acuerdo a los datos históricos del Servicio Geológico Colombiano, se tiene una intensidad importante para San Juan de Pasto con 3 eventos de 8 grados en la escala EMS-98 como se observa en la siguiente figura desde 1827 hasta 2014.

Figura 23

Sismicidad histórica municipio de Pasto



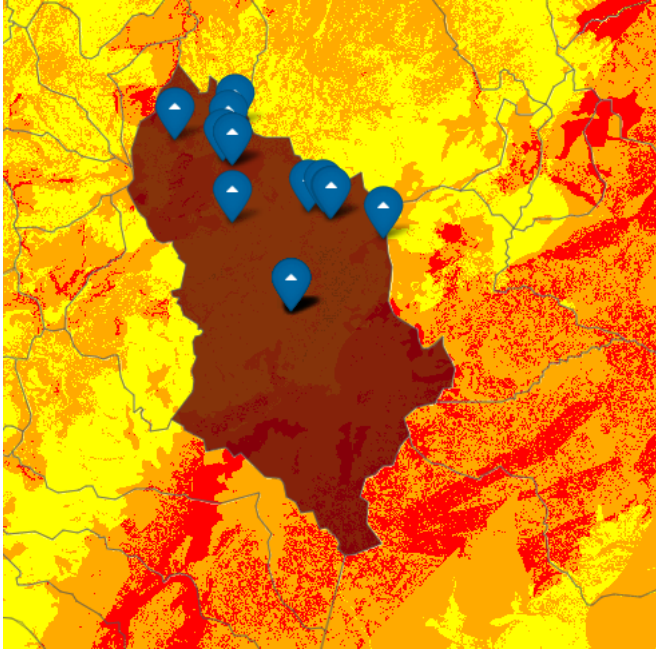
Fuente: SGC (2023).

2.1.5 Antecedentes movimientos en masa

El Servicio Geológico Colombiano en el año 2015 desarrolló el Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa escala 1:100.000, en el cual identificó que aproximadamente el 50% del territorio nacional se encuentra categorizado en amenaza baja por movimientos en masa, 22% amenaza media, 20% amenaza alta y 4 % en amenaza muy alta. En el departamento de Nariño se presenta predominio de la categoría de susceptibilidad media (61 %), en la totalidad de sus municipios, predomina en la subregión Pacífica, específicamente en el centro oriente de los municipios de Tumaco, Roberto Payán, Magüí Payán, Santa Bárbara (Iscuandé); además, en la subregión sur, en los municipios de Ipiales, Potosí, Córdoba y Pasto (Plan Departamental de Agua de Nariño, 2020).

Figura 24

Antecedentes de remoción en masa en el municipio de Pasto



Tipo	cantidad
Deslizamiento	23
Caída	10
Propagación lateral	1

Fuente: SGC (2023).

2.1.6 Geología local- Resultados exploración y muestreo en el sitio de estudio

En el estudio geotécnico se realizaron 5 apiques a una profundidad de 6 metros con ayuda de un barreno y se tomaron 3 muestras de suelo adicionales en los taludes existentes, a profundidades entre 10 y 11,5 metros. Lo anterior teniendo en cuenta las especificaciones de la NSR-10 título H, capítulo H.3 para una complejidad baja.

De manera general se encontraron varios tipos de estratos incluido capa vegetal (limo orgánico), y limos arenosos de alta compresibilidad colores grises, habano claro, habano oscuro y cafés. No se encontró nivel freático.

A las muestras recolectadas se les efectuó ensayos generales de granulometría (INV E-123), Humedad Natural (W %) bajo la norma INV E-122; límites de consistencia: Limite líquido (%LL), Limite plástico (%LP), índice de plasticidad (%IP), norma INV E-125-126 y también se realizaron

ensayos de corte directo CD, teniendo en cuenta la norma I.N.V. E-154. A continuación, se presenta la localización de los ensayos realizados y en seguida los resultados de los laboratorios y perfiles estratigráficos.

Figura 25

Distribución de 5 apiques y 3 puntos para toma de muestras adicionales

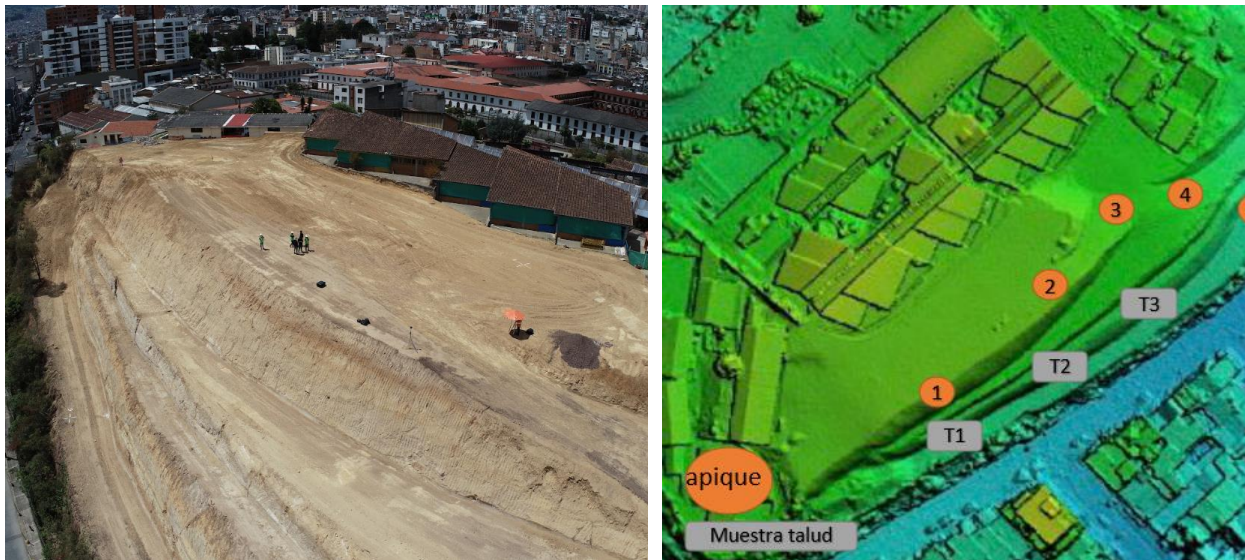


Tabla 14*Resultados ensayos laboratorio 5 apiques y 3 muestras adicionales*

Apique /muestra	Profundidad (m)	W (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	% que pasa tamiz			USC	Qu Kg/cm ²	Densidad húmeda	Humedad natural
						#4	#40	#200				
1	4,92	40,06	48,27	36,59	11,68	100	91,83	78,96	MH	1,58	1,62	40,06%
2	4,85	43,24	47,35	35,91	11,44	100	92,68	80,23	MH	1,64	1,65	43,24%
3	4,99	42,29	43,64	32,44	11,20	100	87,90	72,29	MH	1,70	1,69	42,29%
4	5,06	43,42	44,20	33,32	10,88	100	89,67	70,95	MH	1,72	1,67	43,42%
5	4,90	40,42	45,82	34,97	10,85	100	88,38	72,13	MH	1,64	1,67	40,42
M1	11,50	39,30	48,67	33,23	15,44	100	89,31	73,57	MH	1,68	1,62	39,30%
M2	10,35	42,10	49,38	34,29	15,09	100	88,96	73,10	MH	1,73	1,63	42,10%
M3	10,15	43,03	49,27	35,67	13,60	100	87,75	71,88	MH	1,74	1,64	43,03%

A partir de la caracterización geotécnica obtenida con los resultados de los ensayos de laboratorio y considerando los parámetros geotécnicos típicos recomendado por la bibliografía de referencia, para los tipos de material que se encuentren en la zona del proyecto, se definen los parámetros de resistencia al corte para efectuar la modelación y el análisis de estabilidad del talud.

Tabla 15

Parámetros de suelo obtenidos del ensayo de corte directo

Parámetros	Valor
Peso específico (KN/m ³)	16.6
Angulo de fricción (°)	30,7
Cohesión (KN/m ²)	83

De acuerdo con la prospección geotécnica y a los análisis de laboratorio, la zona de estudio presenta homogeneidad en los suelos y predomina el Limo de alta plasticidad en la superficie.

Según el estudio de suelos la estratigrafía del subsuelo se estableció a partir de los resultados obtenidos en las perforaciones, ensayos de campo y laboratorio.

El perfil típico del subsuelo se resume en el siguiente estrato:

- **a 11.50 m:** Limo de alta plasticidad de color café amarillento y consistencia media a firme.

Clasificando en el sistema unificado de suelos U.S.C.S. MH.

Después de realizar los diferentes laboratorios de determinación de límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, granulometría (porcentaje que pasa tamiz #200), en cada una de las muestras se obtuvieron resultados promedios de 41,73%, 47,07%, 34,55%, 74,13% respectivamente, de esta manera se pudo clasificar el suelo como un limo de plasticidad media. Además, estos ensayos permitieron determinar la densidad húmeda y el porcentaje de humedad natural promedio de 1,65 y 41,73% respectivamente. En el estudio no se reportó nivel de agua

freático, se analiza el porcentaje de humedad del suelo y la permeabilidad característica de suelos finos y se encuentra que estos valores son altos y que en temporada de lluvias pueden generar saturación de la primera capa del subsuelo y posibilidad alta de erosión interna del material expuesto en el talud.

2.1.7 Caracterización sísmica local.

En este capítulo se describe el tipo de suelo de fundación y se analiza su comportamiento sísmico en términos de lo establecido en la Norma Sismo Resistente NSR-10.

De acuerdo con las clasificaciones que establece NSR – 10 Tabla A.2.4-2, la clasificación del tipo de perfil de suelo a nivel de fundación se realiza a partir del valor promedio de Q_u (resistencia a la compresión simple) correspondiente a 1.68, obteniendo así un tipo de suelo D. En la siguiente tabla se observa los parámetros que permiten determinar la aceleración horizontal K_h .

Tabla 16

Requisitos generales de diseño y construcción sismorresistente

Zona	Pasto
Zona de amenaza sísmica	Alta
Aa	0,25
Av	0,25
Tipo de suelo	D
Fa	1,3
Fv	1.9
Coefficiente de importancia I	III- 1,25

Para análisis pseudoestáticos se considera una aceleración sísmica de 50% de la aceleración según Hynes-Griffin y Franklin, 1984, modelo utilizado para acciones sísmicas en taludes y en correspondencia lo descrito en el capítulo H tabla H.5.2.1 de la NSR-10, en todos los materiales térreos como puede presentarse en este sector, se debe aplicar un coeficiente de diseño de 50% que es con el que se calculó el K_h (Sismo horizontal).

$$Kh = Aa * Fa * I * K_{ST}$$

$$Kh = 0,25 * 1,3 * 1,25 * 50\%$$

$$Kh = 0,2031$$

2.1.8 Tecnología LiDAR

El levantamiento topográfico con tecnología LiDAR fue puesto a disposición de la investigación por parte de la Fundación Biocuenca. Esta tecnología corresponde a un sensor ZENMUSE L1 y RGB el cual integra un módulo Livox LiDAR, una IMU de alta precisión y una cámara con RGB CMOS de 1 pulgada 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 muy alta precisión. Presión; 0.025° (balanceo/cabeceo) / 0.08° (guiñada); sensor de visión para precisión de posicionamiento; fusión de datos GNSS, IMU, RGB.

Figura 26

Zenmuse L1 LiDAR y RGB



El sensor LiDAR se ubica en el **dron Matrice 300 RTK de DJI** el cual ofrece un tiempo de vuelo de hasta 55 minutos, una avanzada IA y un nuevo sistema de gestión de su estado VANT. Cuenta con el sistema OcuSync Enterprise que ofrece una distancia de transmisión de hasta 15 km y es capaz de transmitir señal de video en 1080 p por triple canal. Así mismo, el cambio automático en tiempo real entre las bandas de frecuencia de 2.4 GHz y de 5.8GHz permite un vuelo más estable cerca de entornos con muchas interferencias, mientras que la encriptación AES-256 ofrece una transmisión segura de datos lo que garantiza que la información de la misión quede protegida y solo agentes autorizados puedan acceder a ella.

Una característica importante de este dron es la seguridad ya que cuenta con un sistema de sensores detectores de obstáculos sin precedentes, 12 sensores de visión estereocópica (2 para cada frente del dron), lo que asegura la cobertura 360° más confiable del mercado para volar más seguro. Además, se puede ajustar la distancia de seguridad entre el dron y un obstáculo lo que flexibiliza el uso de este en espacios más reducidos que lo habitual. Cuenta con diseño certificado IP45 que mejora la resistencia al agua y polvo para que pueda volar en todo tipo de entornos (Fundación Biocuenca, 2023).

Figura 27

Dron matrice 300 RTK de DJI.

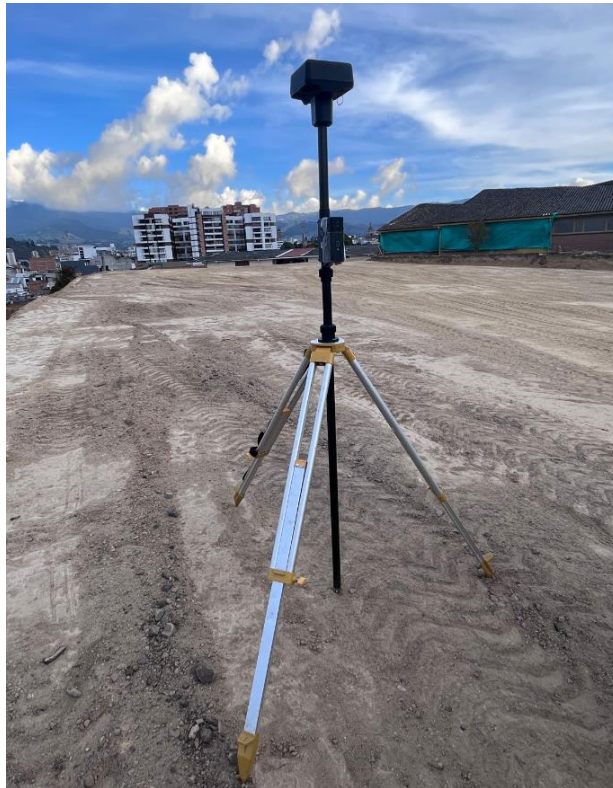


La tecnología Dron Matrice 300 RTK de DJI + Sensor LiDAR Zemnuse L1 de DJI, se complementa con la estación D-RTK2 de DJI. Esta estación móvil es el receptor GNSS de alta

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 28

Estación D-RTK2 de DJI + Leica GPS 1200



2.2 Procesamiento de la información y análisis de resultados objetivo 2

El segundo objetivo específico corresponde a: “comparar los modelos de elevación digital del terreno con diferentes metodologías”, en ese sentido se describe el procedimiento y resultados de la construcción del MDT con cada método

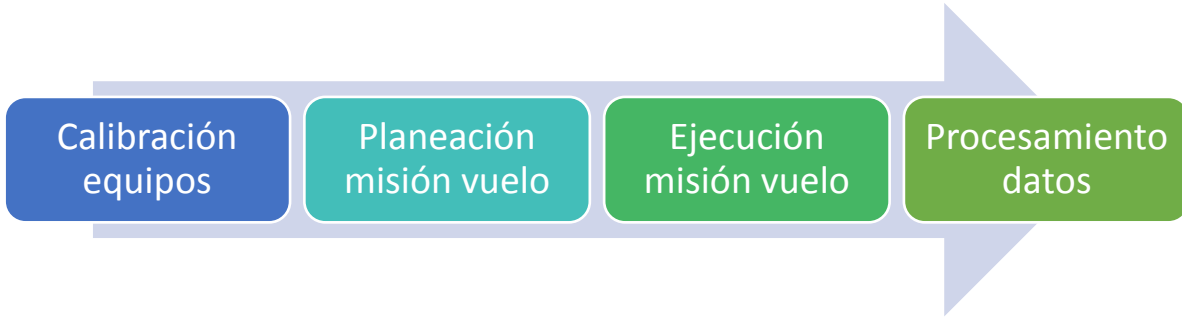
2.2.1 Modelo digital del terreno con datos LiDAR

Para el levantamiento topográfico con la tecnología LiDAR se realizó un procedimiento que integra

4 pasos como se observa en la siguiente figura con su respectiva descripción posterior.

Figura 29

Esquema de levantamiento topográfico



Paso 1: Calibración de equipos. Inicialmente se realizó la ubicación de la estación D-RTK2 en un espacio despejado y aproximadamente central de toda el área, posteriormente se hace la conexión entre el dron y la estación D-RTK2, mediante las 4 antenas del dron. Una de las características importantes que se debe tener en cuenta es que el sensor IMU (sensor de posición) debe estar a una temperatura adecuada y que antes del vuelo es necesario que obtenga un calentamiento adecuado, y se debe realizar una calibración de la brújula manual. En la siguiente figura se ilustra el proceso

Figura 30

Calibración de equipos para vuelo con LiDAR



Ubicación RTK2



Antenas de conexión entre dron y D-RTK2



Calibración manual de a brújula.

Paso 2: Planeación de vuelo. En este paso inicialmente se realiza la búsqueda del mapa satelital de referencia, donde se demarca los límites del área del levantamiento, también se selecciona el tipo de levantamiento en este caso, LiDAR, y se define una serie de parámetros como los siguientes:

- Superposición lateral: 55%, cantidad de líneas de vuelo necesarias para cubrir totalmente el área a fotografiar con la correspondiente superposición lateral.
- Superposición Frontal: 75%
- Área seguridad: 10m, esto quiere decir que apartir de la zona seleccionada para el levantamiento abarque 10 metros alrededor de el.
- Retorno laser: 3 emisiones de rayos del LiDAR para el levantamiento.
- Adición de color nube de puntos: SI, esta opcion permite que en el momento de que va scando la nube de puntos, estos puedan verse con color para dar un mejor efecto visual.
- Velocidad: 6.5m/s, velocidad a la que vuela el dron.
- Puntos: 291/m², puntos a levantar en un metro cuadrado.
- Altura de vuelo: 20 m, representa la altura a la que va a volar el dron respecto a la superficie del terreno.

Figura 31

Mapa satelital



Figura 32

Delimitación del área de levantamiento



Figura 33

Definición de parámetros antes de vuelo



Paso 3: Ejecución de vuelo. Una vez se define los parámetros, se tuvo un tiempo total de recorrido de 4.58 minutos; cuando el droné inicia el vuelo, él hace un proceso de calibración del

IMU (sensor de posición) en el aire y finalmente realiza el levantamiento aéreo.

Figura 34

Calibración de IMU aérea



Figura 35

Elevación de vuelo



Figura 36

Levantamiento topográfico instantáneo



Paso 4: procesamiento de datos. Se realiza todo el procesamiento de datos en el software DJI-Terra y así se obtiene la topografía del terreno.

Inicialmente se verifican los datos tomados el día del levantamiento, esa información es segregada en dos fases, la información de la fotografía y la información de datos en archivos, cada archivo contiene partes de la nube de puntos y el modelo que se va a construir.

Considerando que los softwares de procesamiento de datos de nubes de puntos trabajan bajo un estándar asociado a formatos “punto last” (.last), el cual es un estándar mundial ya establecido, como primera medida, se procedió a realizar el cambio de los datos en crudo a formatos .last; para el caso específico de esta investigación, los datos arrojados por sensor LiDAR de la marca DJI, se transforman con el software de la misma marca llamado DJI- Terra, el cual toma los archivos y los pega en un formato estandarizado. last.

Para la clasificación de nube de puntos se utilizan diferentes tipos de softwares, dentro del módulo de Terra Modeler se encuentran inmersos 3 softwares, *Terra Modeler* hace un modelamiento del terreno en 3D, *Terra Match* ayuda a adjuntar nubes de puntos, *Terra Scan* se encarga de hacer un escaneo sobre la nube de puntos y ayuda a hacer clasificaciones de los puntos.

Conversión a LAS:

Figura 37

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

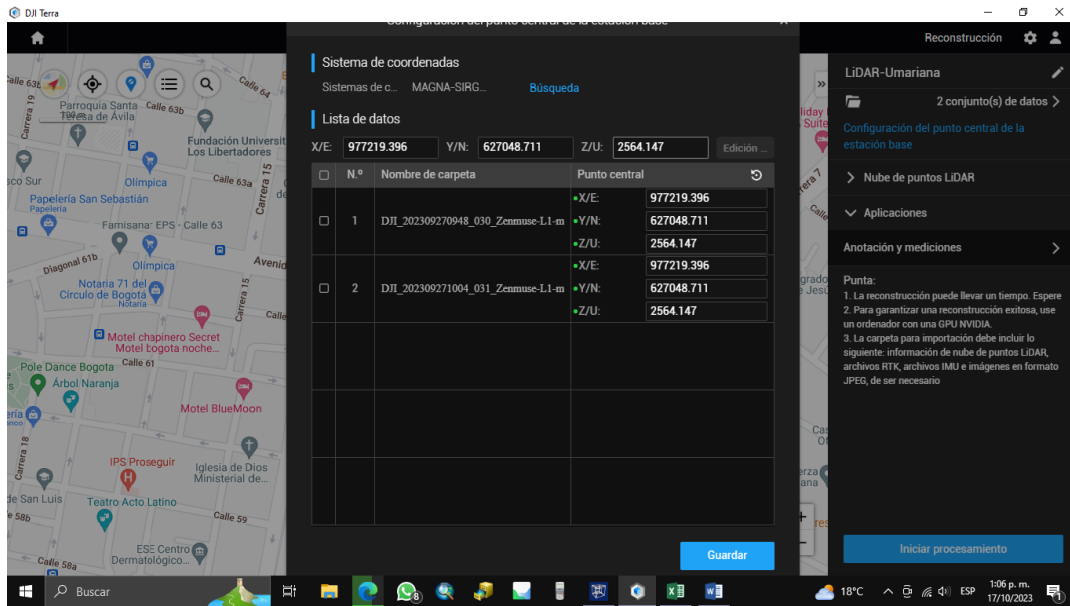
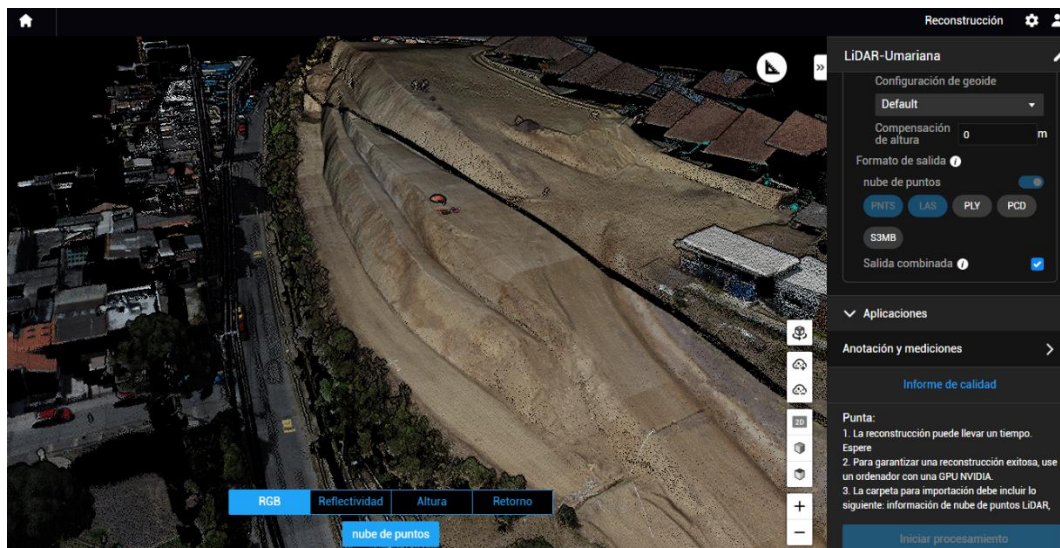


Figura 38

Resultado reconstrucción de nube de puntos LiDAR formato LAS



Se procede a realizar la clasificación de nube de puntos, para lo cual se realiza la creación de proyecto en spatix, cargando nube de puntos y trayectorias de vuelo asignando coordenadas según corresponda.

Figura 39

Creación de proyecto en spatix

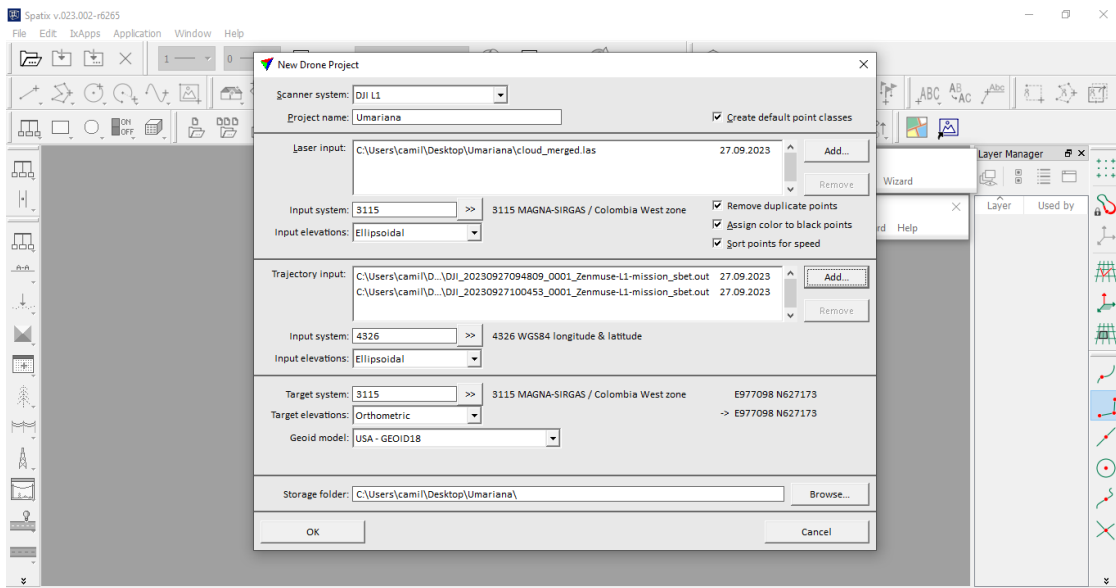
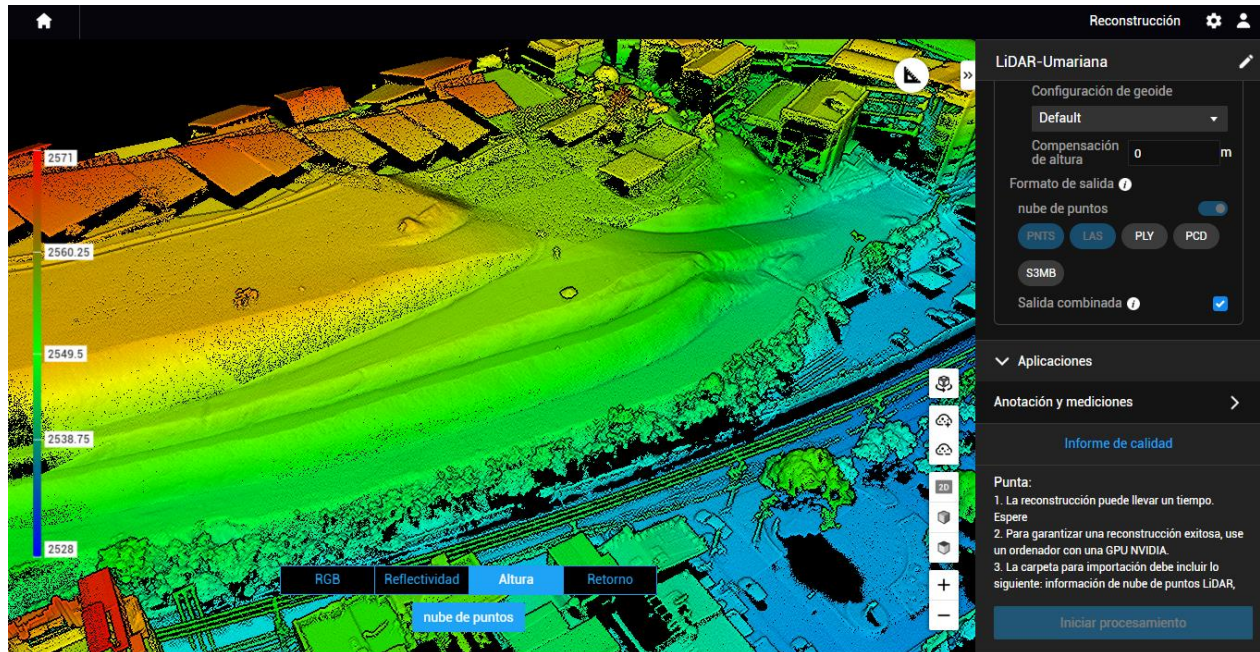


Figura 40

Comparación de color vs trayectorias de vuelo

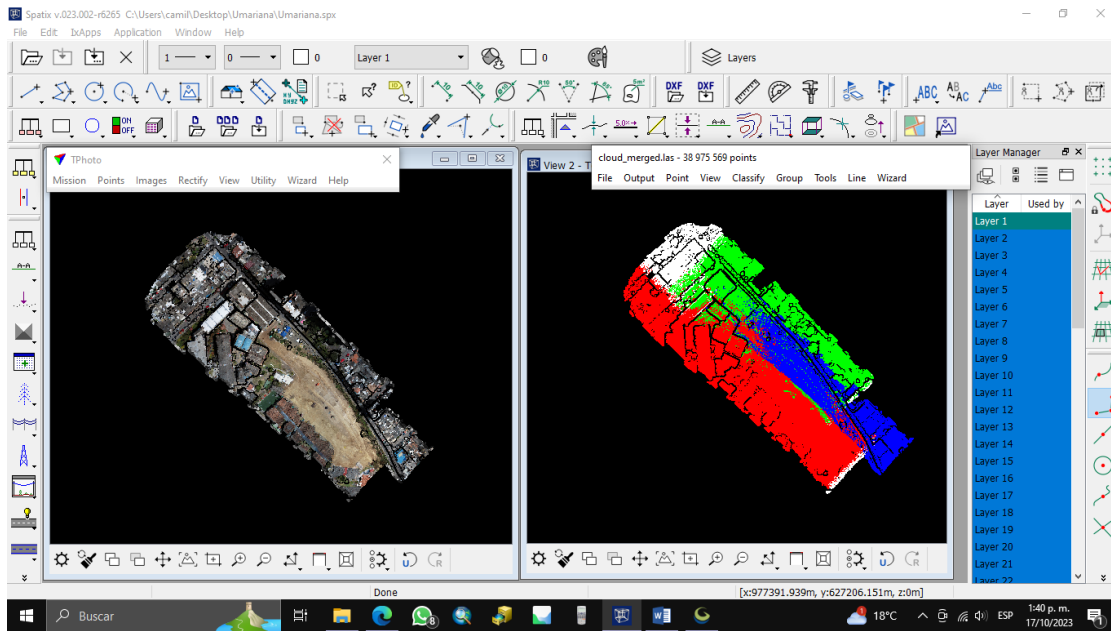
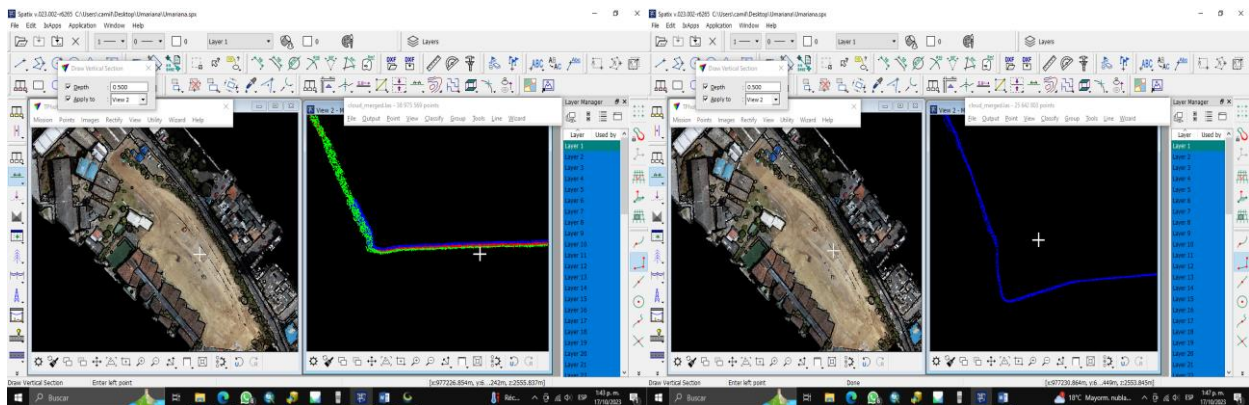


Figura 41

Recorte de overlape, suavizado y reducción de punto de ruido



Nota: Nube optimizada

Figura 42

Clasificación de puntos de terreno

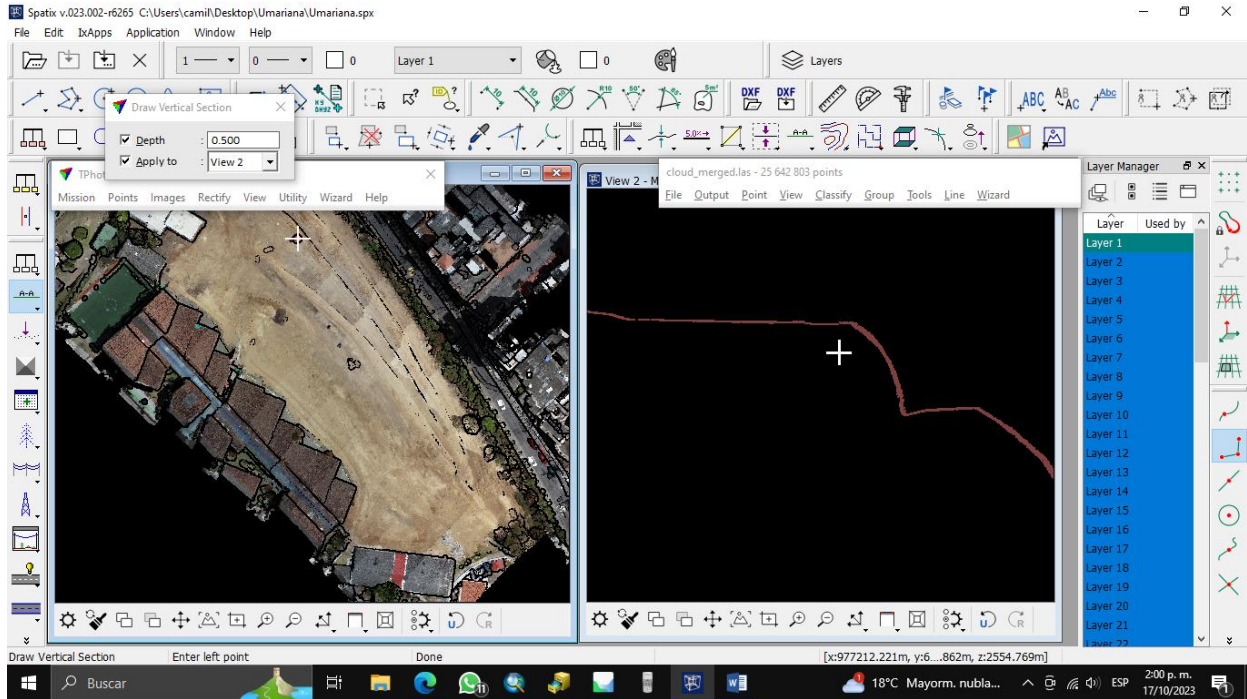


Figura 43

Creación de modelo digital de elevaciones con global mapper y generación de curvas de nivel

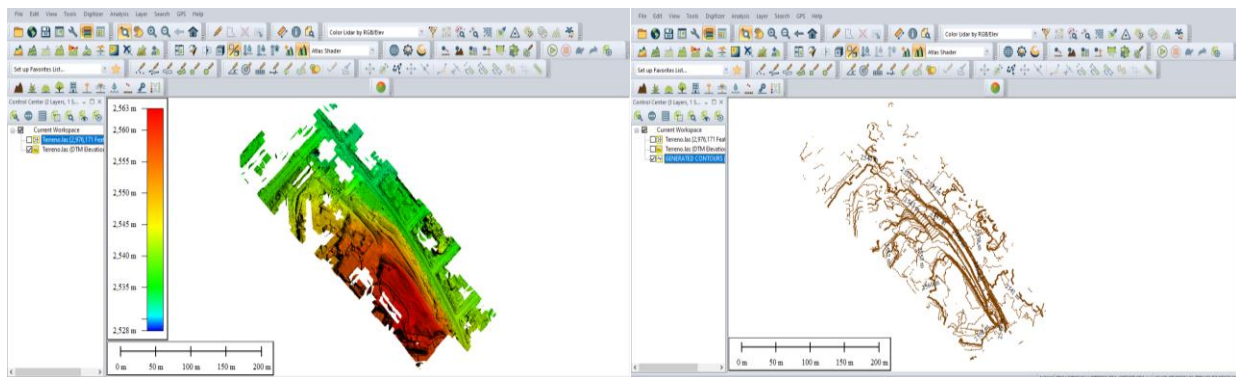
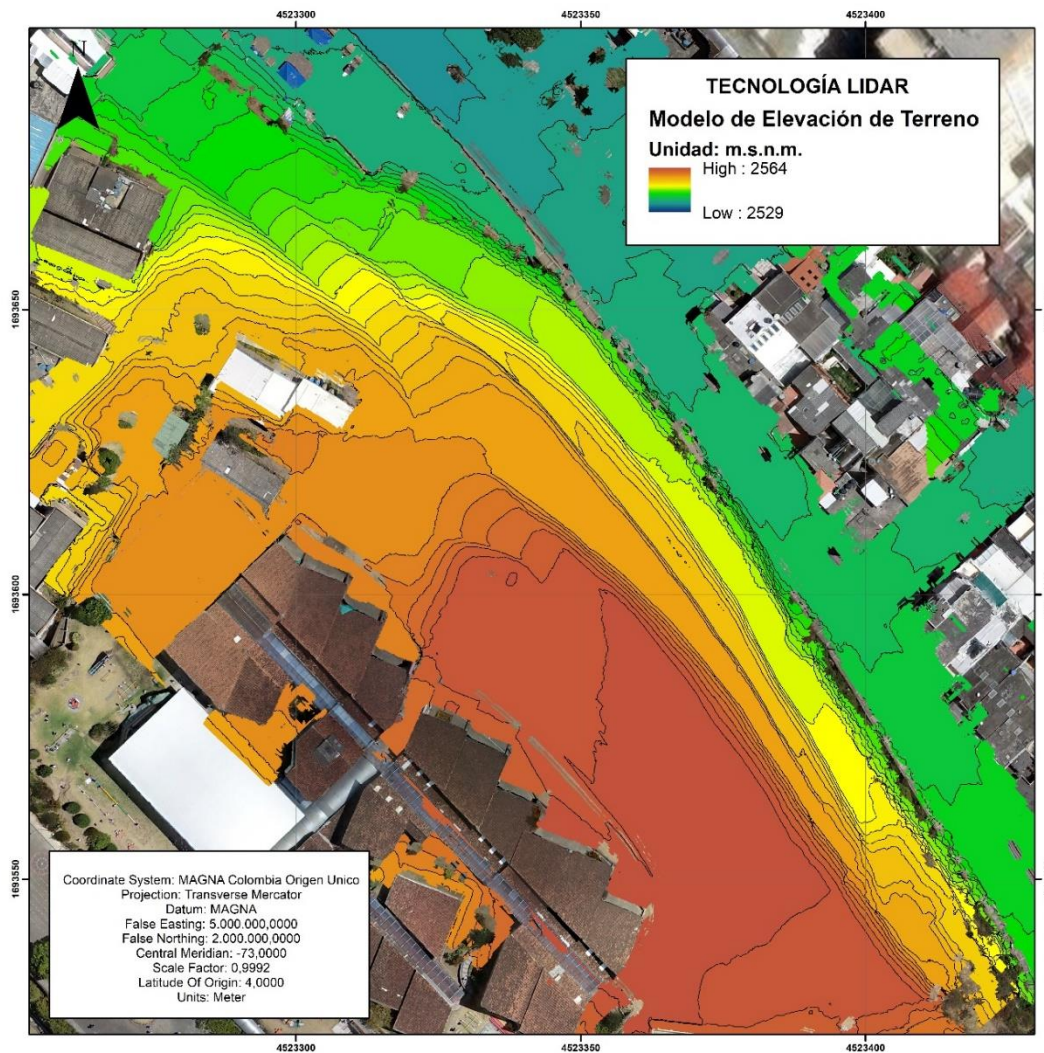


Figura 44

Modelo digital de terreno con topografía LiDAR



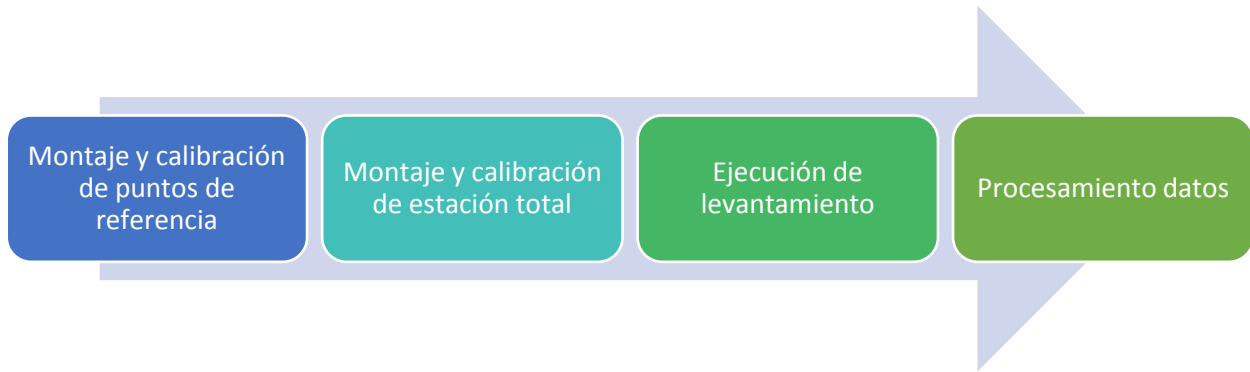
En el Anexo A se presenta la topografía en dwg, plano en planta y secciones generados con los datos LiDAR.

2.2.2 Modelo digital del terreno con topografía convencional

Para el levantamiento topográfico convencional se realizó un el siguiente proceso

Figura 45

Esquema levantamiento topográfico convencional



A continuación, se describe brevemente como se realizó el levantamiento topográfico convencional.

Paso 1: montaje y calibración de puntos de referencia. Para iniciar el levantamiento primero se implantaron puntos de referencia en 2 partes del talud, en los cuales se instaló el trípode, una vez instalado se procedió a calibrarlo, con el fin de sobreponer s el sistema GNSS para registrar las coordenadas del punto, y finalmente se procedió a medir con una cinta métrica la altura “sobre el nivel del mar”, en este caso el terreno, para tener la cota inicial exacta

Posteriormente en la Colectora se registra las coordenadas del punto de referencia inicial, de ahí se generó una línea de azimut para poder tener línea con la estación total. Este equipo sirve también para comprobar si las coordenadas obtenidas están en el área de estudio, mediante imágenes satelitales.

Este proceso se hizo de la misma manera con el segundo punto.

Figura 46

Montaje y calibración de puntos de referencia



Punto de referencia #1



Verificación calibración



Instalación de GNSS



Verificación de coordenadas en Colector

Paso 2: montaje y calibración de la estación total. Lo primero que se realiza en este paso es el montaje y ajuste de la estación total, después se lleva a cabo la nivelación de la estación total, donde se ajusta la altura de las patas y se mueve los tornillos de la estación hasta tener la brújula a nivel.

Figura 47

Montaje y calibración de estación total



Montaje de estación



Calibración de estación

Paso 3: Selección del archivo de trabajo. Se enciende el equipo con el botón ON, se procede a seleccionar en el menú principal, la opción de levantar, donde indica el archivo que se va a trabajar, posteriormente se da la opción de mediciones y se crea al archivo, luego se anotan los datos de las coordenadas y la altura instrumental de la estación y del segundo punto, finalmente se corroboro si las coordenadas estaban bien para proseguir con el levantamiento.

Figura 48

Selección del archivo de trabajo topografía convencional



Selección de tipo de trabajo, levantamiento



Anotación de coordenadas y altura instrumental

Paso 4: ejecución de levantamiento: Para este paso, se procede a posicionar el prisma en dirección a la estación, en los diferentes puntos para la toma de datos del levantamiento, se realizaron tres tomas al pie del talud, centro y borde de talud, (cada 10 metros), finalmente se hace la notación de coordenadas y se procede a guardar, este último paso se repite cuantas veces se quiera para el plano topográfico.

Figura 49

Levantamiento topográfico



Paso 4: procesamiento de datos. Se realiza todo el procesamiento de datos empleando el software Civil 3D.

El equipo que mide los niveles topográficos almacena la información (niveles), a través de una tarjeta de memoria llamada PCMCIA, el cual reúne un bloque de datos, ésta se extrae del equipo y se inserta en un computador y es aquí donde separa la nube de puntos en un programa llamado LEICA, aquí se puede evidenciar datos como: la fecha, la coordenada este, la coordenada norte, la cota y el código, esta es una información importante para unificar los lotes de terreno, en la actual topografía se tomaron 355 puntos, se procede a guardar en un archivo CSV, y se obtiene una nube de puntos en Excel, con ésta información se digitaliza la información.

Se procede a importar la información de nube de puntos de excel al programa civil 3D, y se realiza la unificación de los puntos creando la superficie real de la topografía existente, este

procedimiento se lleva a cabo uniendo los puntos, los cuales están digitalizados mediante códigos que se han manejado desde el procedimiento en campo, se generan las curvas de nivel, posteriormente se realiza la triangulación y la depuración de información que no se requiere.

A partir de este paso se pueden realizar los cortes que se requieran para la comparación con la tecnología LiDAR.

Figura 50

Procesamiento de datos

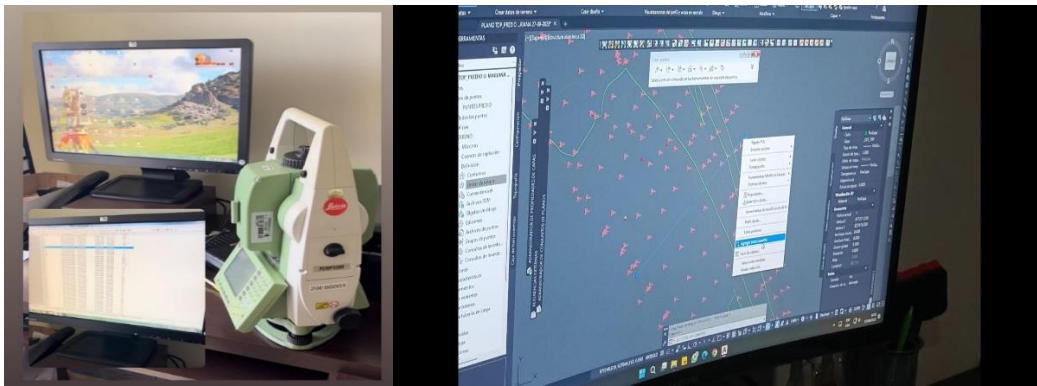


Figura 51

Curvas de nivel

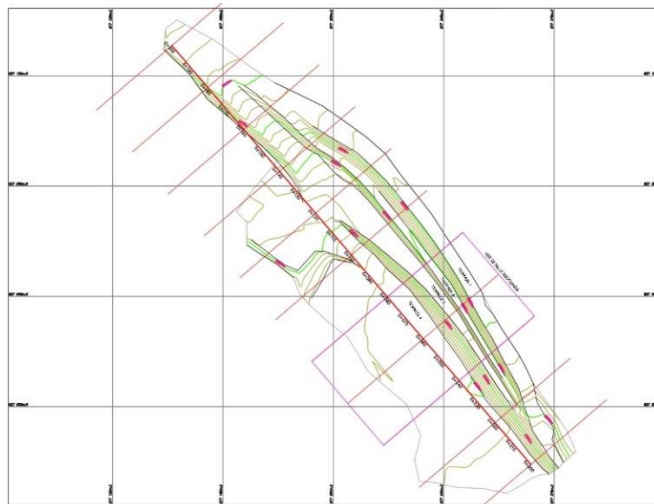


Figura 52

Área de levantamiento

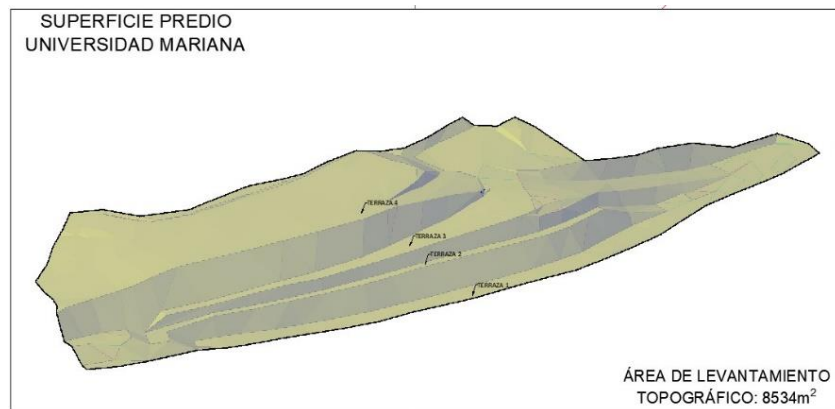
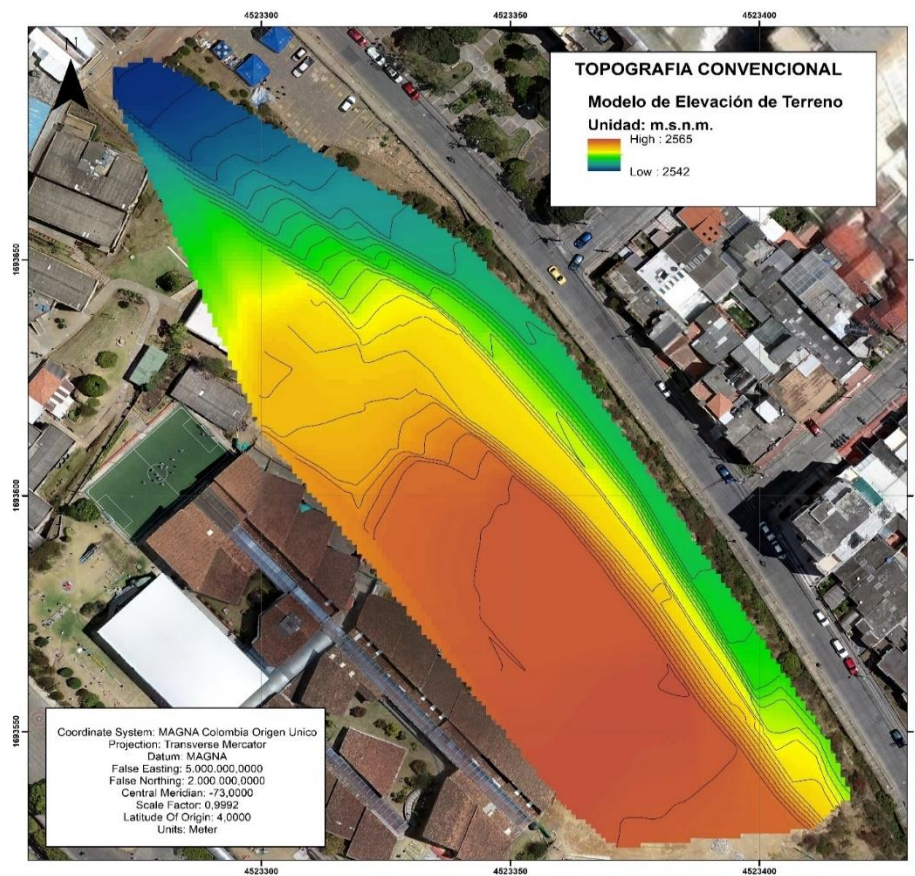


Figura 53

Modelo Digital de Terreno con topografía convencional



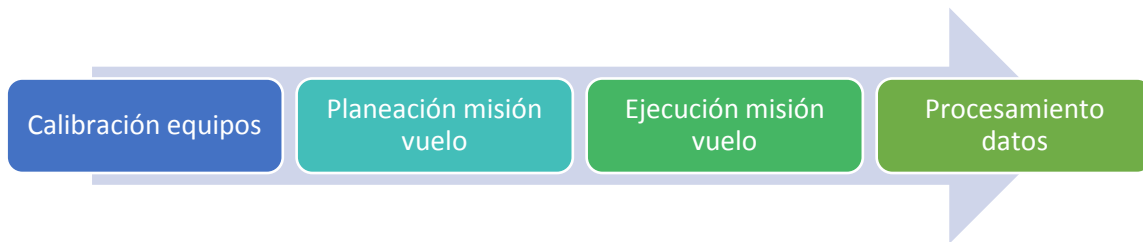
En el Anexo B se presentan los archivos correspondientes a topografía convencional en formato dwg, cartera topográfica, plano en planta y perfiles.

2.2.3 Modelo digital del terreno con fotogrametría

El proceso con fotogrametría es similar al descrito en el ítem 2.2.1, se emplea el mismo dron que se empleó para el levantamiento con LiDAR, pero el procesamiento de datos es diferente y algunas variables del vuelo también como área y altura. A continuación, se retoman y explican los pasos respectivos.

Figura 54

Esquema levantamiento topográfico con fotogrametría



Paso 1: Calibración de equipos. Consiste en calibrar los equipos a emplear tales como estación D-RTK2, conexión y calibración dron D-RTK2 de la misma manera que se describió en el procedimiento para topografía LiDAR. En este mismo paso es importante analizar las variables climáticas, resaltando las condiciones de viento y de lluvia, si las condiciones son óptimas se procede con la planificación del vuelo.

Paso 2: Planeación misión de vuelo. Se planifica el vuelo a partir de los aplicativos DVJI (nombre de la marca), esta marca tiene unos aplicativos geográficos donde se puede planificar el vuelo desde el mismo control, o desde el aplicativo de Google Earth, aquí se le da la dirección al dron, la velocidad del vuelo, el tiempo de duración de las fotografías.

Paso 3: Ejecución de la misión de vuelo. Se procede a armar el equipo, la RTK, la estación en un punto conocido, se arma el dron con sus baterías, y el control. Se procede a realizar la

fotogrametría, el dron se puede elevar entre 80m y 100m, a una velocidad de 5 m/s, para la fotogrametría de área se demoró 5 minutos, de tal manera que fue satisfactoria la planificación del vuelo.

Paso 4: Procesamiento de datos. Una vez desarrollado el vuelo la información queda grabada en una memoria de alta capacidad de lectura, cada una de las fotografías con sus respectivas coordenadas para la georreferenciación. Para el procesamiento se ingresa las fotografías en el software Agisoft Metashape; el software agrega las fotos, las orienta, las procesa y realiza una nube de puntos y los une mediante las coordenadas, se procesa de acuerdo a la calidad que se quiera procesar, para el actual trabajo se realizó en alta calidad y el resultado final es un orto mosaico, el cual es la unión de todas las imágenes georreferenciadas, con las cuales se puede sacar áreas, perímetros, también se puede sacar los modelos de elevación superficial que permite obtener curvas de nivel con un buen detalle y con resultados favorables debido a que es un área despejada.

Figura 55

Ortofoto



Figura 56

Definición de área de estudio con fotogrametría

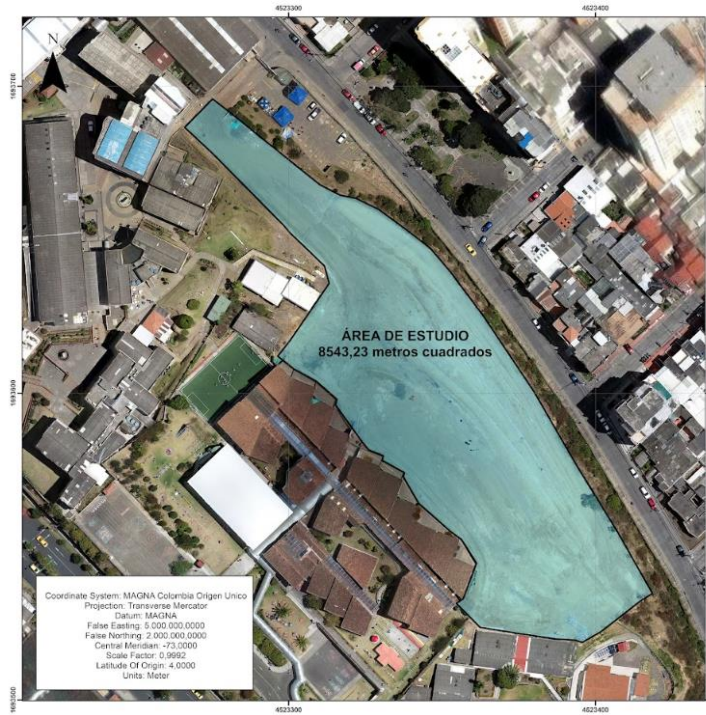
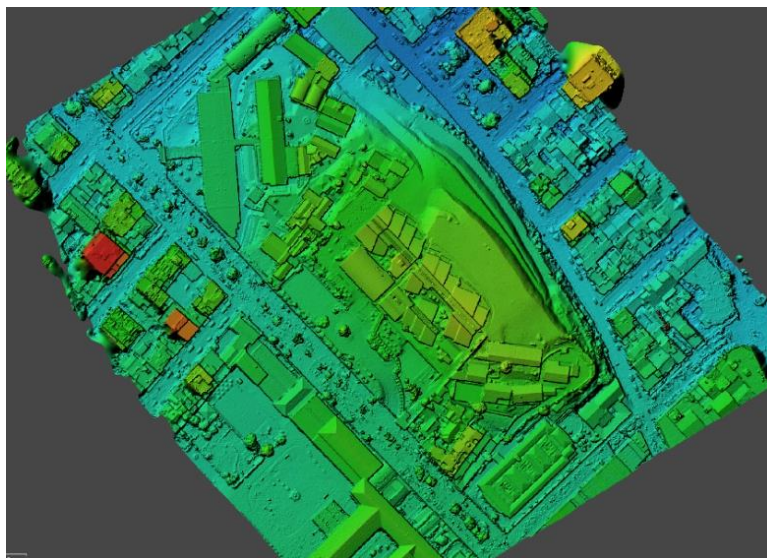
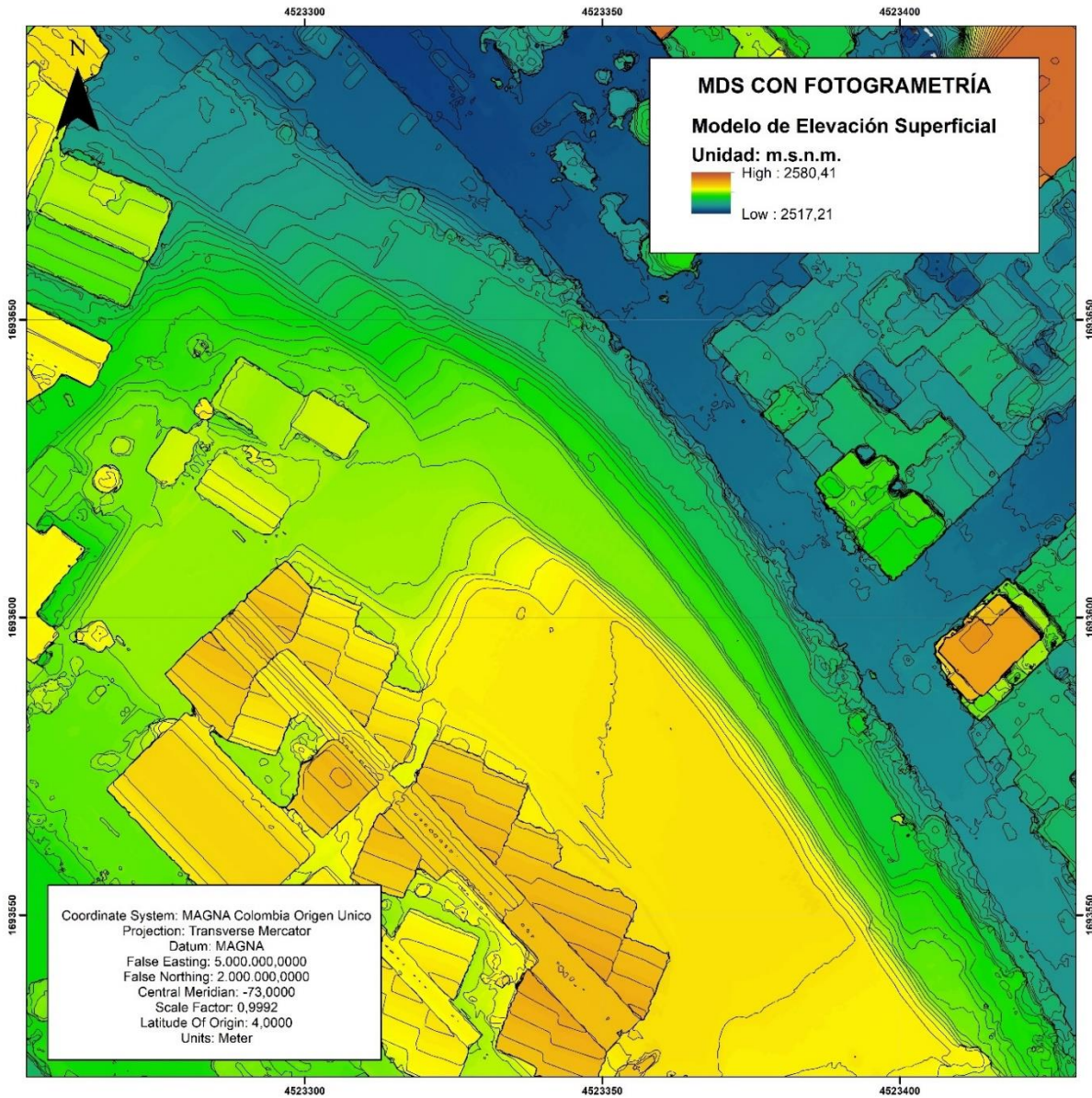


Figura 57

Modelo digital de superficie con fotogrametría





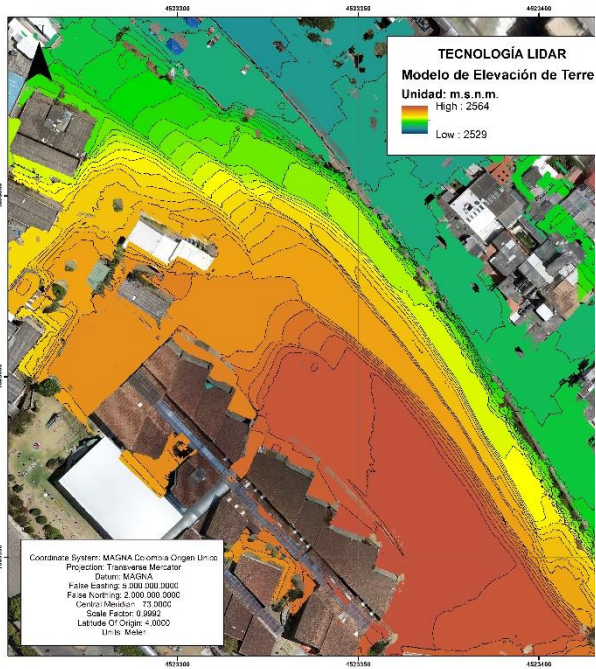
En el Anexo C se presenta las fotografías del levantamiento por fotogrametría.

2.2.4 Comparación Modelos de elevación digital de terreno con diferentes tecnologías

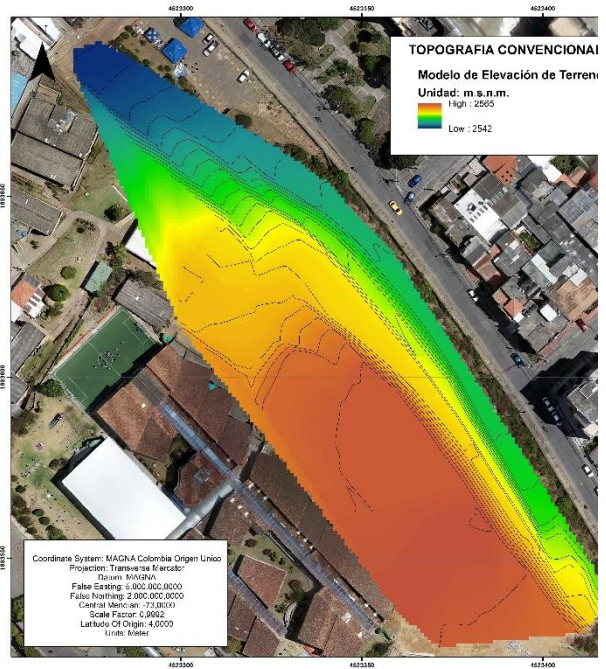
A continuación, se presentan los tres modelos construidos con los datos de las diferentes topografías.

Figura 58

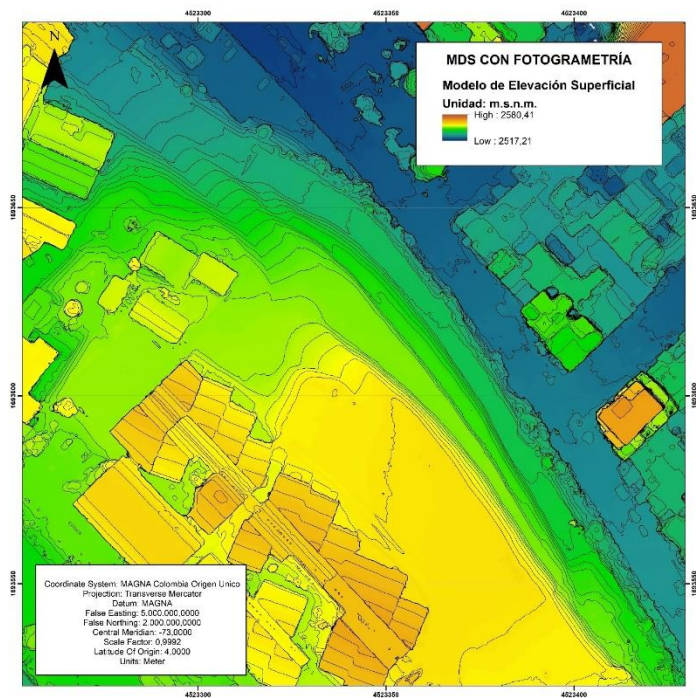
Modelos digitales con los 3 métodos de levantamiento topográfico



(A) LiDAR



(B) Convencional



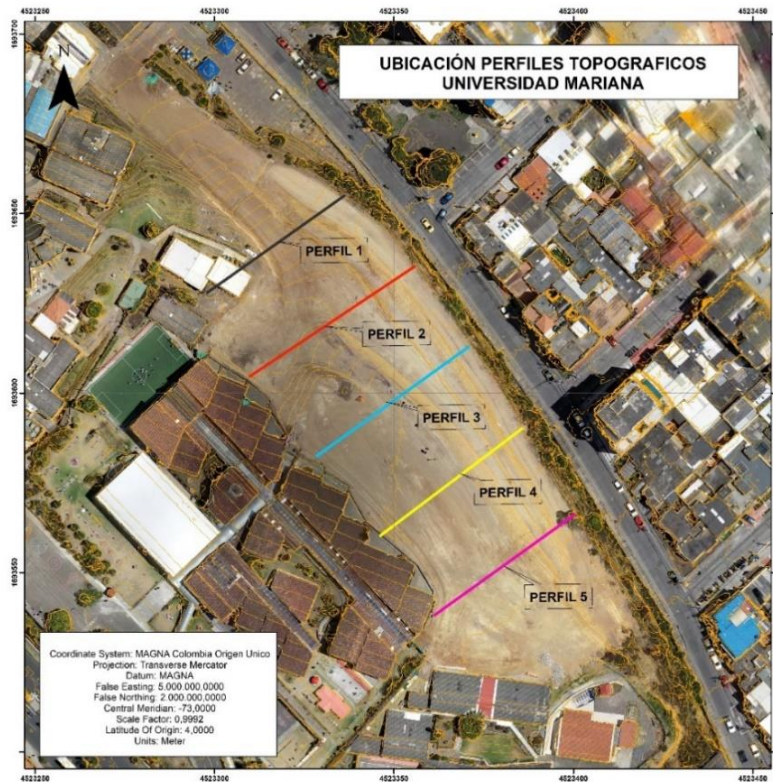
(C) Fotogrametría

Como se puede observar, el modelo digital con datos LiDAR (imagen A) arroja mayor precisión, se visualizan mayor cantidad de curvas de nivel, más área levantada topográficamente, incluso en zonas de difícil acceso o con cobertura vegetal. El modelo digital con datos de topografía convencional (imagen B) arroja una menor cantidad de curvas de nivel y por lo tanto menor detalle, no se alcanza a percibir desniveles, cunetas, canales, bordes ya que no es posible llegar hasta todos los puntos y se efectúa una extrapolación de datos. Finalmente, el modelo digital con fotogrametría se evidencia un error en la altimetría, dado que la parte superior del talud se resalta en amarillo cuando en los otros dos modelos esta zona alta ya está en color rojo, este error será más evidente en el análisis de los perfiles que se efectúa más adelante.

Con el procesamiento de información descrito en los ítems anteriores, se realizó la comparación de los perfiles topográficos señalados en la siguiente figura.

Figura 59

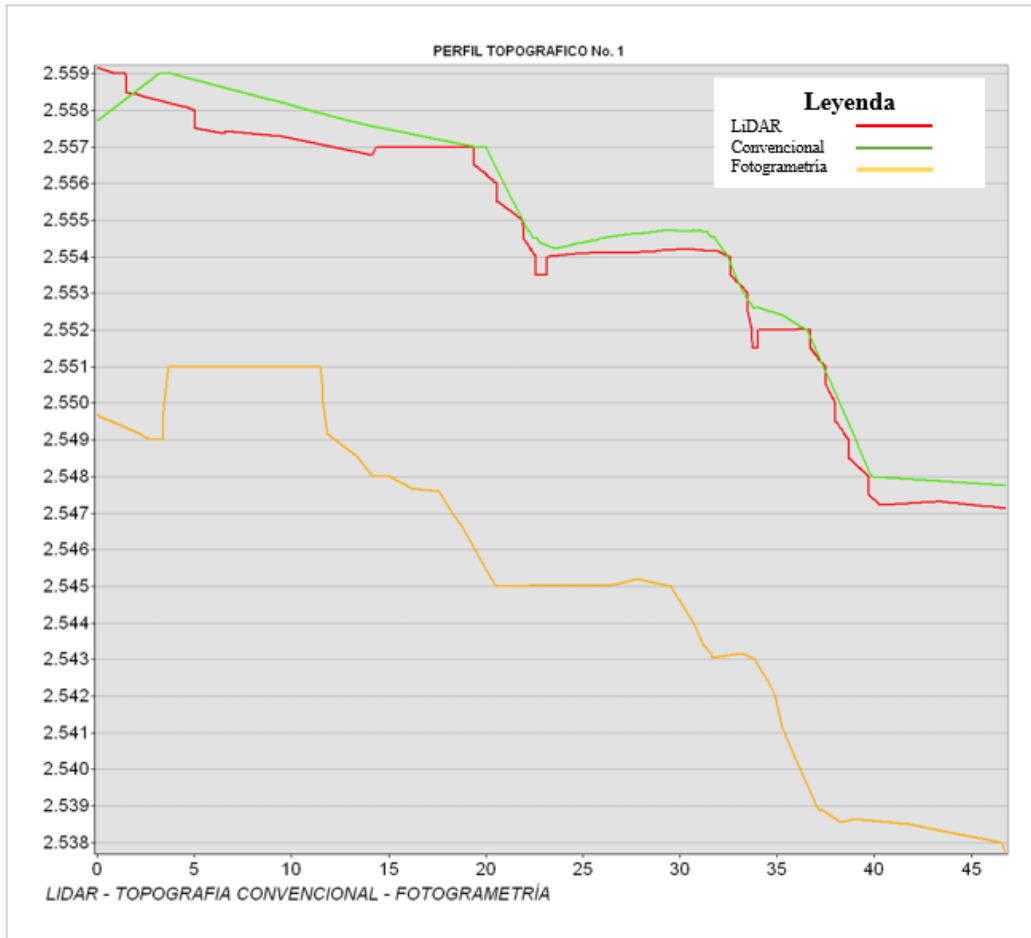
Perfiles topográficos, Universidad Mariana.



Se generaron 5 cortes cada 26 a 28 metros y se procedió a comparar con las topografías de los 3 métodos. La línea verde representa la topografía convencional, la línea roja representa la topografía LiDAR y la línea naranja representa la topografía con fotogrametría. A continuación, se presenta cada uno de los perfiles y se amplía la descripción del corte N. 1 y del corte N. 4.

Figura 60

Comparación perfiles topográficos Corte N. 1



De manera general se aprecia que la topografía convencional y la topografía LiDAR tienen mayor similitud en elevación, con 1 m.s.n.m de diferencia, caso que no ocurre con la topografía con fotogrametría que si varía considerablemente con 8 y 9 m.s.n.m respectivamente. Se alcanza a apreciar mayor detalle en el trazado de la línea roja, inclusive se aprecian 2 cunetas que no se

apreciaban visualmente en campo y que tampoco salen en la convencional. También se puede inferir que la topografía convencional al tomar menos puntos, realiza la triangulación generando un trazado recto sin mayor detalle. Finalmente, el trazado color naranja incluye las edificaciones presentes y tiene una altura distinta. De ahí que se comprueba que la fotogrametría no es viable para estudios de detalle, como se referencia en la literatura es factible utilizarla para estudios preliminares y obtener una vista agradable con las fotos, pero no es especializada para dar detalles del terreno.

En las siguientes figuras se pueden apreciar los cortes realizados en el talud, con la respectiva topografía de los tres métodos utilizados y su respectiva leyenda las cuales precisan el alto grado de detalle de la topografía LiDAR con respecto a la topografía convencional y a la topografía con fotogrametría.

Figura 61

Comparación perfiles topográficos Corte N. 2

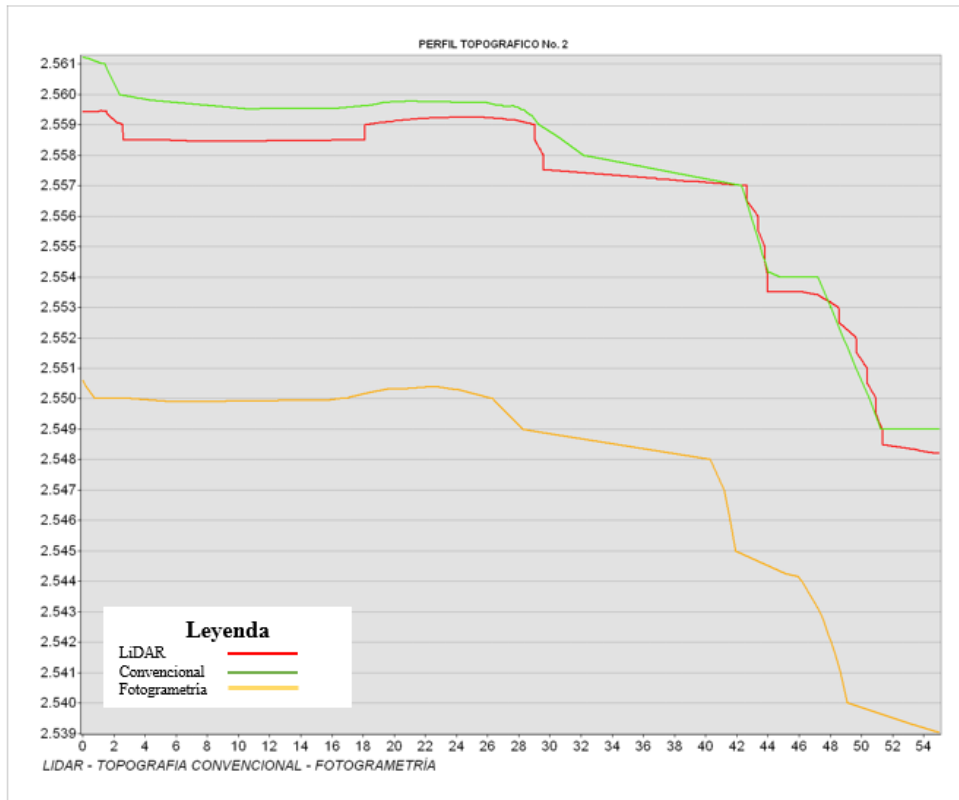


Figura 62

Comparación perfiles topográficos Corte N. 3

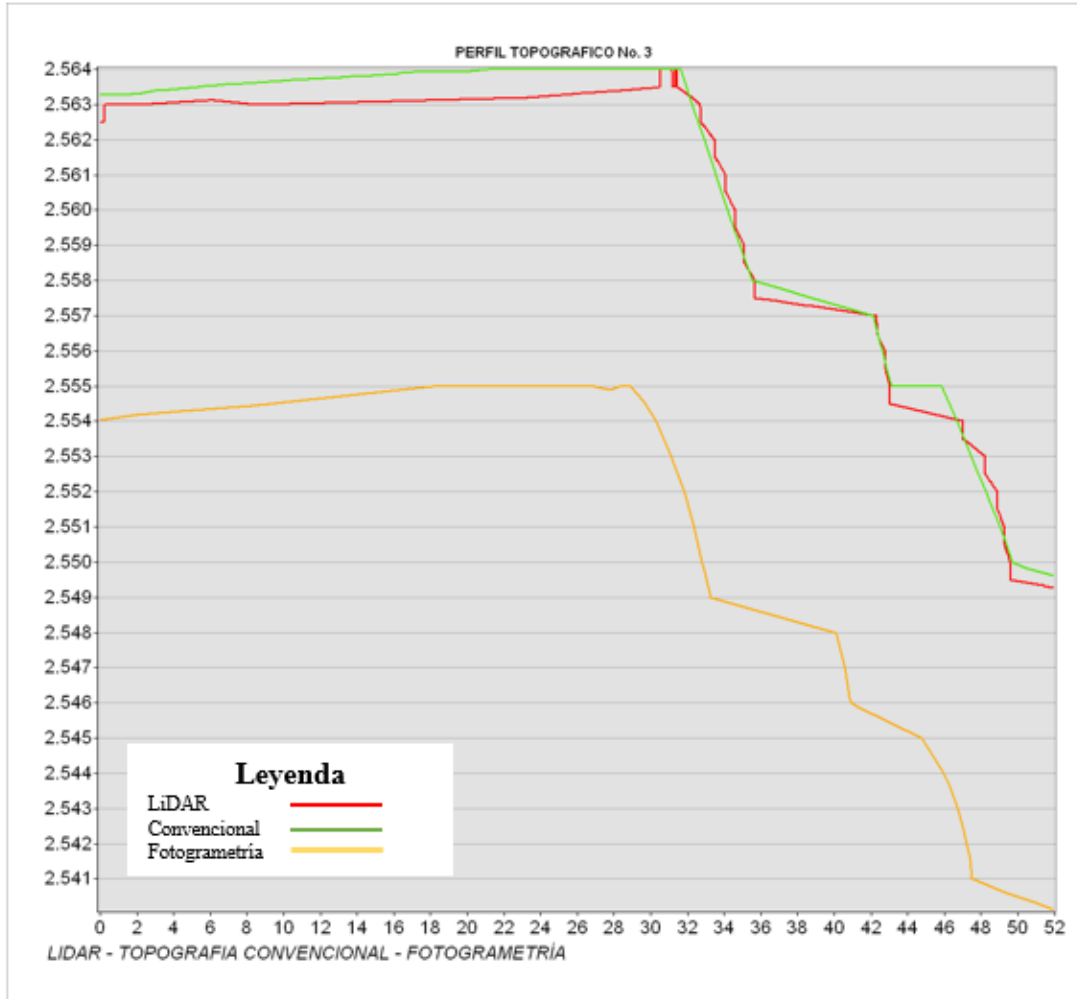
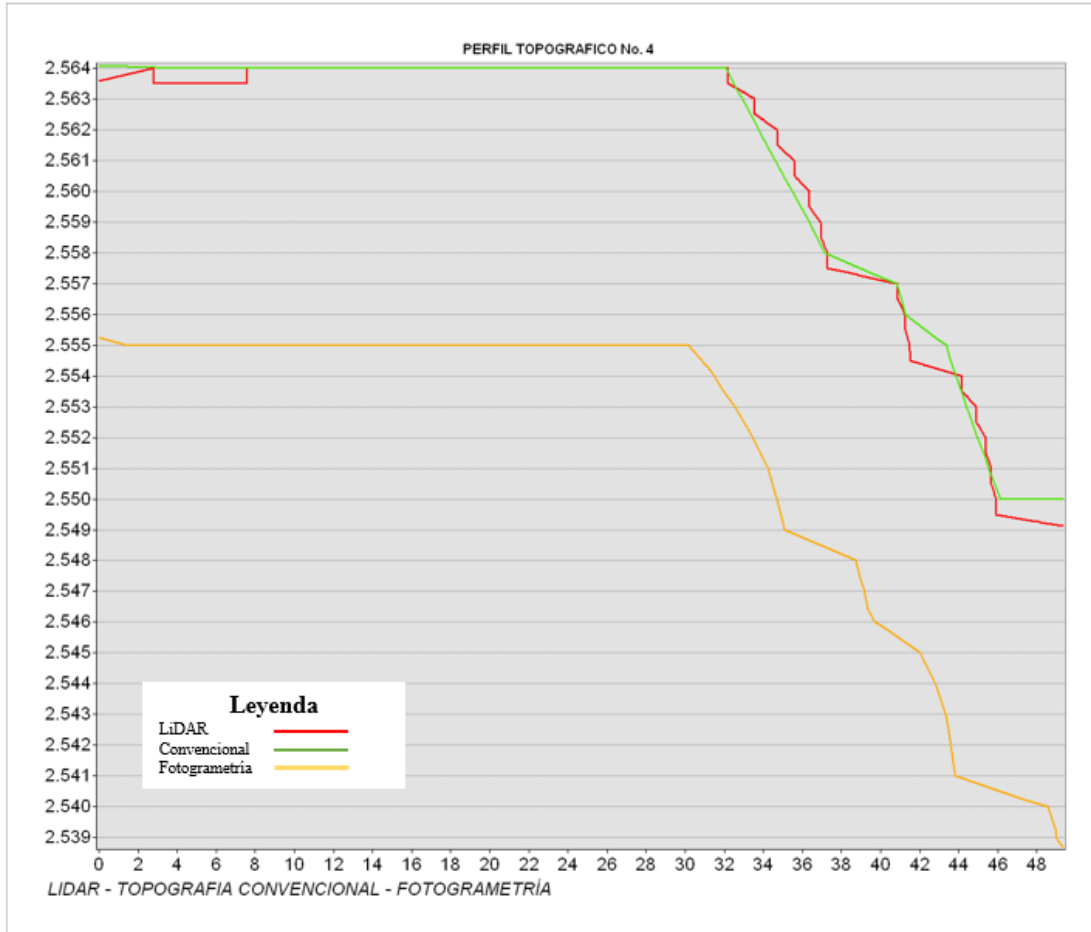


Figura 63

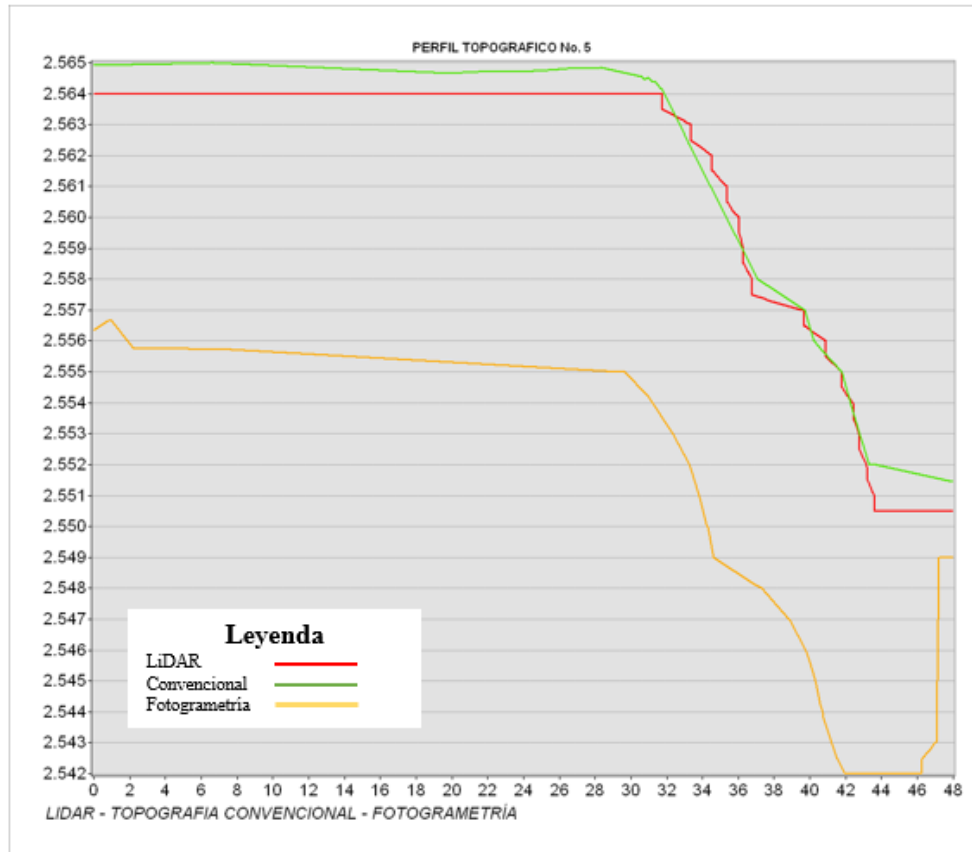
Comparación perfiles topográficos Corte N. 4



En terrenos homogéneos, planos y libres de cobertura vegetal, la topografía convencional y LiDAR es igual, como se observa en la parte inicial de la figura, más adelante se aprecian algunas diferencias, tales como mayor detalle con LiDAR en el desnivel. Sobre el punto (43, 2.555 m.s.n.m) es evidente que el topógrafo extrapolo, seguramente porque no fue posible en terreno llegar a ese punto, sin embargo, con LiDAR si se logró llegar hasta el talón del talud y por eso es tan diferente.

Figura 64

Comparación perfiles topográficos Corte N. 5

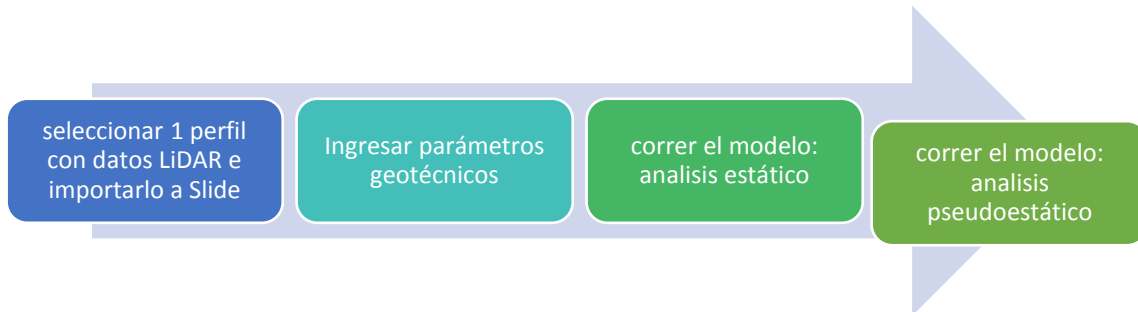


2.3 Procesamiento de la información y análisis de resultados objetivo 3

El tercer objetivo específico corresponde a: “realizar el análisis de estabilidad de talud por el método de equilibrio límite usando el MDT con datos LiDAR.” En este objetivo se empleó el software SLIDE 6.0 de Rocscience, en condición estática y pseudoestática, un perfil topográfico con datos LiDAR y parámetros geotécnicos de la zona de estudio descritos en el objetivo número 1. La metodología se resume en la siguiente figura.

Figura 65

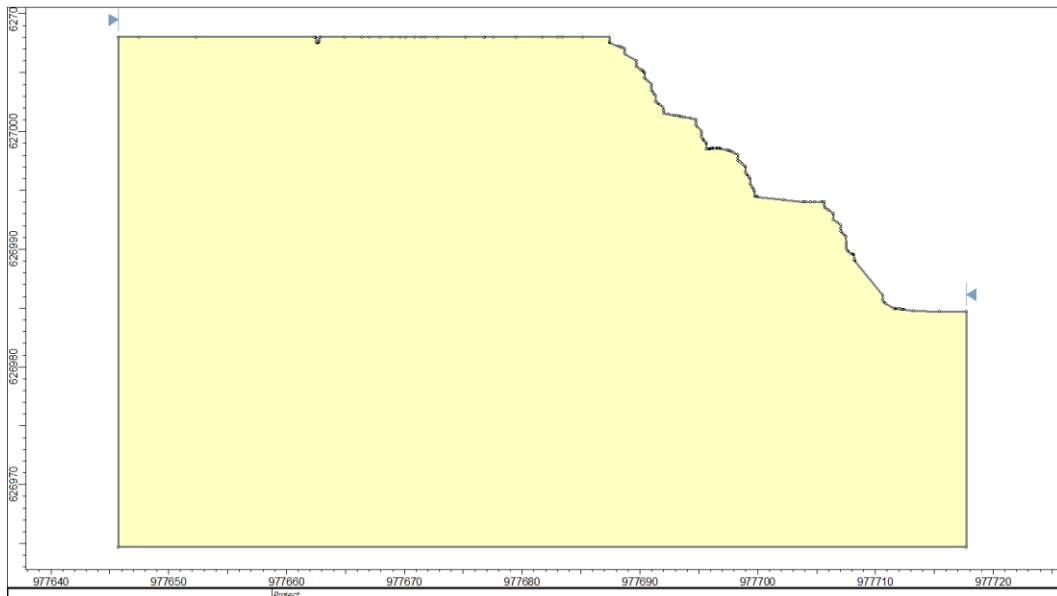
Metodología análisis de estabilidad del talud en Slide



Paso 1: Seleccionar un (1) perfil con topografía LiDAR. Con el fin de determinar la estabilidad global según la inclinación y la altura de los cortes, se seleccionó el que tenía mayor altura para las secciones geotécnicas existentes. La investigación sobre la estabilidad del talud se orientó a la determinación del Factor de Seguridad del perfil seleccionado, en ese sentido y considerando que el perfil N°4 presenta mayor similitud entre las topografías convencional y LiDAR se lo guardo en formato dxf y se lo importo en Slide para efectuar el análisis.

Figura 66

Perfil N° 4 con topografía LiDAR importado a Slide

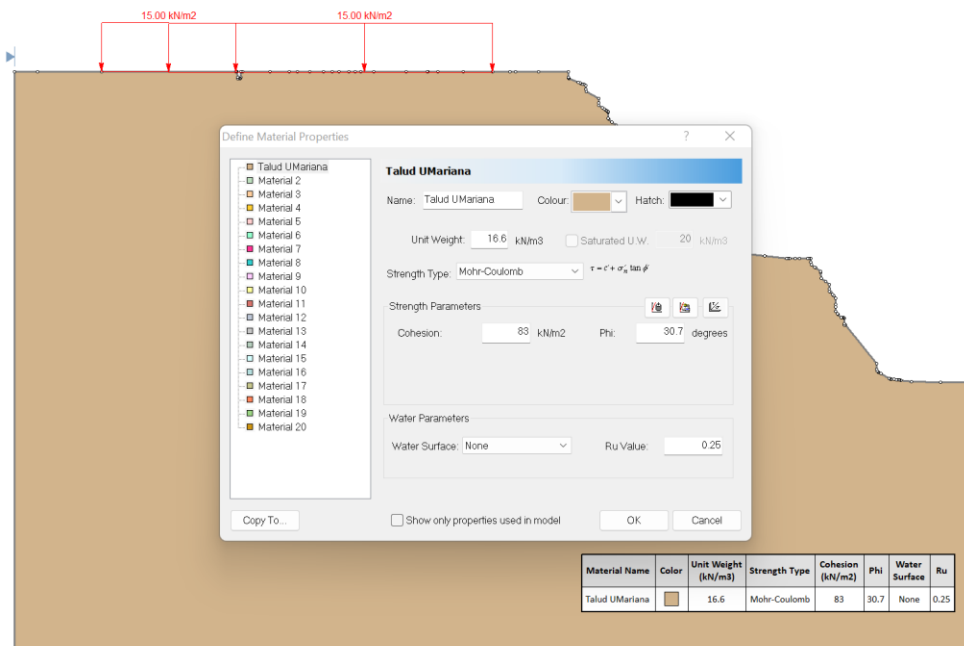


Paso 2: ingresar los datos geotécnicos. El segundo paso corresponde a ingresar los datos para poder correr el modelo, se define los materiales y se le añaden parámetros como: el corte directo de 16.6, la cohesión de 83 kN/m^2 , tipo de resistencia de 30.7, parámetro de saturación $R_u = 0.25$ porque esta totalmente descubierto y no hay drenaje.

En este paso también se seleccionan los métodos de análisis de equilibrio límite tales como: Spencer, Fellenius, Janbú y Bishop y se añaden las cargas verticales distribuidas en caso de posible uso de parqueadero, de 15 kN/m^2 , debido a que es una carga recomendada por Invias.

Figura 67

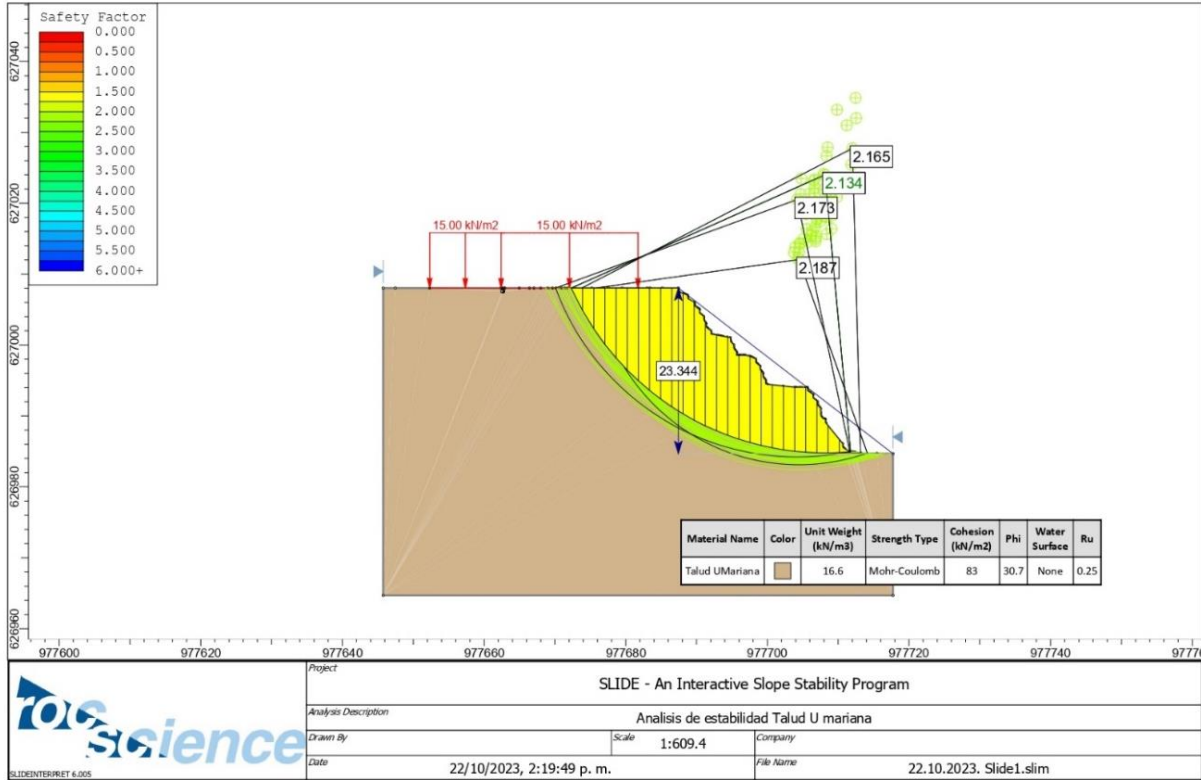
Ingreso de datos geotécnicos para correr el modelo en slide.



Paso 3: Correr el modelo análisis estático. Con los datos ingresados se procede a correr el modelo y se obtuvo un factor de seguridad de 2.134 como se observa en la siguiente figura

Figura 68

Resultado del análisis de estabilidad del talud-estático.

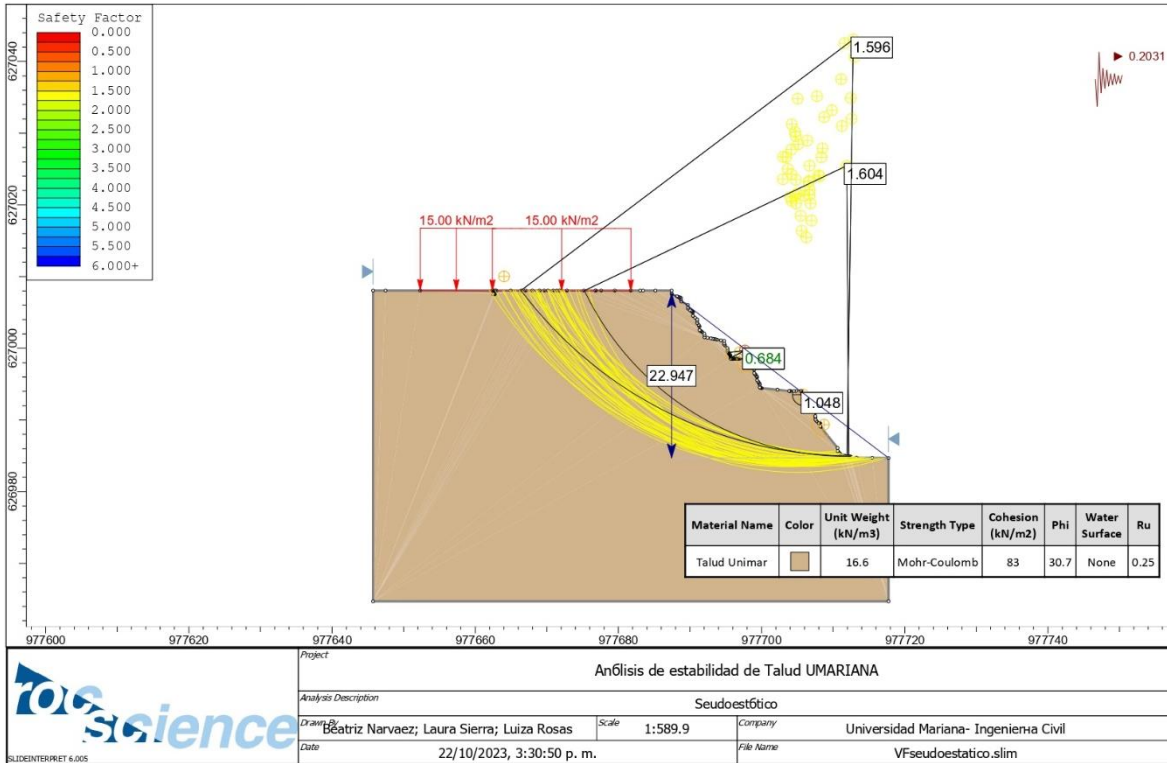


En cumplimiento con la Norma Sismo Resistente NSR-10 título H, según la tabla H.2.4.1 (Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos) dice que debe ser mayor a **FS= 1.5**, bajo condiciones normales de agua sin sismo. Como se puede evidenciar los factores de seguridad son superiores a dicho valor, por lo tanto, se puede deducir que el talud es estable.

Paso 4. Correr el modelo análisis pseudoestático. En el análisis pseudoestático, se adiciona la condición sísmica horizontal ya que es el que más movimiento aporta al suelo, en este caso de 0.2031. En cumplimiento con la Norma Sismo Resistente NSR-10 título H, según la tabla H.2.4.1 (Factores de Seguridad Básicos Mínimos Directos) dice que debe ser mayor a **FS= 1.05**, para condiciones extremas: sismo de diseño y agua, por lo tanto, el talud es estable.

Figura 69

Resultado del Análisis pseudoestático



De acuerdo a los análisis realizados tanto de manera estática como pseudoestática, el talud de la Universidad Mariana en el estado actual, se encuentra estable. Sin embargo, se evidencia que el proceso de estabilización esta inconcluso dado a que no se han terminado las obras de manejo hidráulico. Al no tener terminadas las obras de drenaje superficial, tales como el descole de aguas lluvias, se podrían acumular en la parte superior del talud incrementando el riesgo de erosión interna y la probabilidad de presentarse una remoción o desplazamiento del suelo superficial.

Si bien en las condiciones actuales el talud es estable, en la zona de estudio se pudo identificar las condiciones geomorfológicas del talud, las cuales presentan un alto grado de erosión, representado en grietas fuertemente pronunciadas. Es importante recalcar que los efectos climáticos como lo son las lluvias y el viento pueden provocar desprendimientos de una fracción del suelo, y este es un factor progresivo que con el tiempo puede llegar a generar graves problemas de estabilización, por la cual es necesario ejecutar las recomendaciones presentadas.

Figura 70

Grietas presentes en el talud



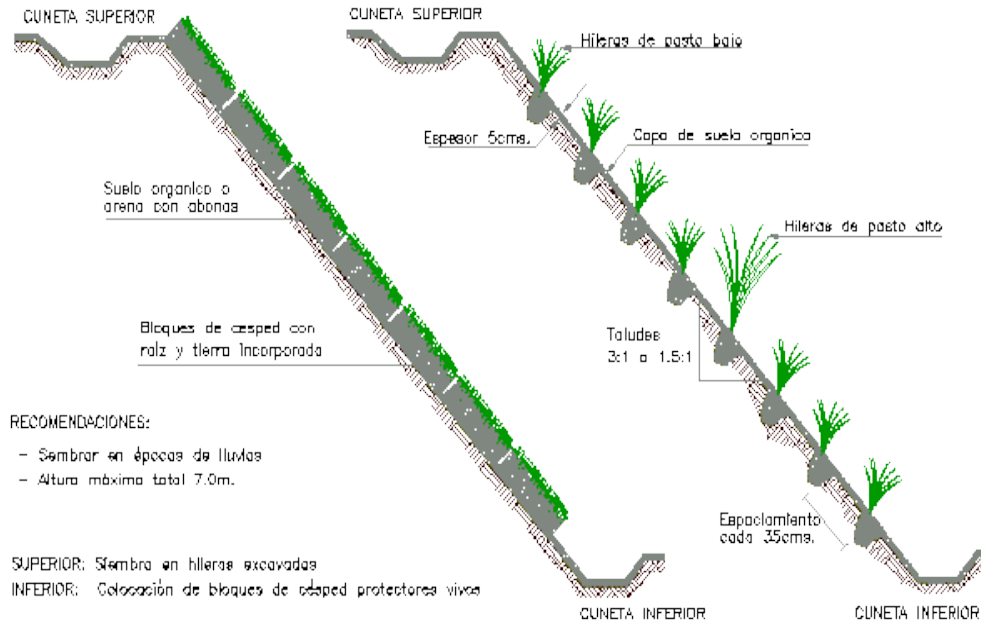
Figura 71

Fallas presentes en el suelo



Figura 72

Esquema de protección con empedrado para taludes de terraplén.



Fuente: Geomatrix (2017).

Deberá evitarse la obstrucción de cursos de agua permanentes e intermitentes y deberán construirse las obras hidráulicas correspondientes que garantice el flujo de agua evitando procesos erosivos que afecten la estabilidad de los taludes.

La revegetación se logra mediante el uso de mantos permanentes para control de erosión con anclajes mecánicos manuales, en particular el TERRATRAC® TRM 15, anclajes Gripple TLA-3 para taludes con inclinaciones hasta de 1.0H: 2.0V como soporte para estabilización y ganchos de acero figurado de 3/8" de 25 cm de longitud para soporte durante construcción y empalmes.

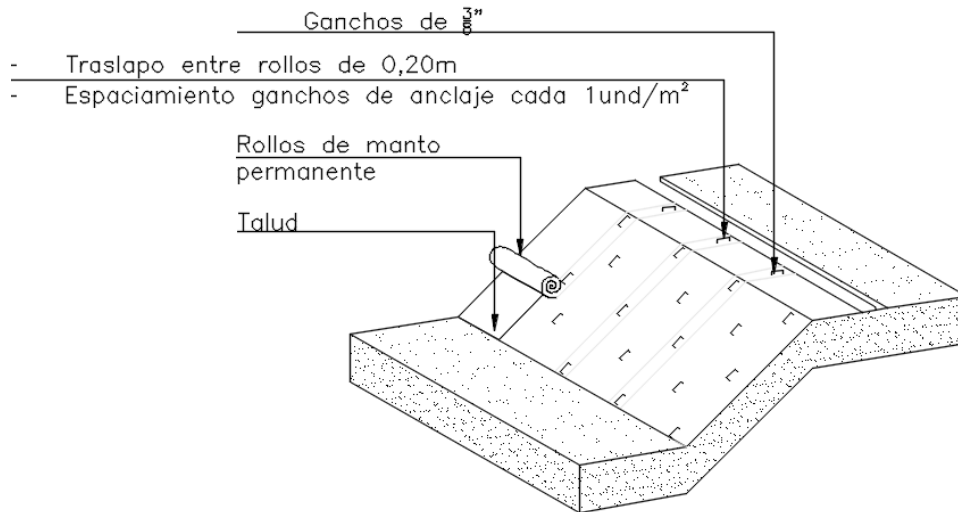
El manto brinda un soporte mecánico que contribuye al desarrollo óptimo de la vegetación, evitando el arrastre por escorrentía de semillas o plántulas de pequeño tamaño que no tengan la capacidad de aferrarse al suelo. Este manto presenta alta resistencia a la tensión y está diseñado 100% sintético aplicable para condiciones con cargas altas y/o requerimientos altos de supervivencia.

Adicionalmente se requiere construir cunetas o zanjas de coronación en la parte superior del talud con pendientes adecuadas para captar y desviar el agua de escorrentía hacia las estructuras de descarga, evitando su paso sobre la superficie a proteger. Construir obras de drenaje complementarias que garanticen un adecuado manejo de aguas de escorrentía.

En la siguiente figura se observa la disposición típica de un manto de control permanente

Figura 73

Perfil proyectado de talud con proyección de solución para estabilización con TERRATRAC® TRM 15, anclajes Gripple TLA-3 de 1,2m de longitud.



Es importante tener en cuenta que la efectividad del manto depende de una correcta instalación y el complemento con un proceso de siembra mecánica o manual, asesorada por un profesional en ciencias agrícolas, quien determinara el tipo de especie adecuado para la región y las condiciones climáticas. El proceso debe estar acompañado de un programa de riego continuo considerando las condiciones de pluviosidad del sitio, y de las obras de arte de drenaje complementarias y muy importantes para la estabilización.

En el Anexo D se presenta información correspondiente al control de erosión por medio de mantos y geomembranas.

3. Conclusiones

Con los resultados de la investigación se comprueba que la tecnología LÍDAR optimiza el tiempo de captura de datos para realizar un MDT, ya que se tardó 5 minutos, mientras que el método convencional tardo 4 horas.

El porcentaje de error entre la Topografía con LiDAR y Convencional es del 5% y topografía con LiDAR y fotogrametría es del 6.3%. En altimetría convencional y LiDAR difieren en 1 m.s.n.m y Fotogrametría y LiDAR en 9 m.s.n.m.

El levantamiento topográfico con LiDAR genera mayor información y por ende mayor precisión; se generaron mallas de 291 puntos topográficos por metro cuadrado, mientras que el método convencional con cadenero fueron mallas aproximadas de 2 a 3 puntos topográficos por m². Se tiene un alto nivel de detalle, se precisan hasta el sistema de cables del sitio de estudio, algo que no sería posible con otras metodologías de levantamiento topográfico.

La fotogrametría es un método que sirve para dar una mejor impresión visual de las superficies digitales de terreno, pero no es recomendable para estudios topográficos por su impresión altimétrica.

El análisis de estabilidad del talud con topografía LiDAR arrojó un factor de seguridad en condiciones normales de 2.134 con lo cual se cumple lo especificado en el NSR-10 por lo tanto el talud es estable.

El perfil topográfico N. 1 es uno de los cortes de la zona estudiada, en este perfil se puede evidenciar el nivel de precisión de las tres metodologías topografías realizadas en el talud de estudio, la fotogrametría tiene un desfase de 8 m.s.n.m. con respecto a la tecnología LÍDAR, en cuanto a la topografía digital el desfase es de 1 m.s.n.m.

De manera general el suelo del sitio de estudio se integra de varios estratos incluido capa vegetal (limo orgánico), y limos arenosos de alta compresibilidad colores grises, habano claro, habano

oscuro y cafés. No se encontró nivel freático. Con relación a los parámetros esencial se encontró un peso unitario de 16.6 KN/m^3 , cohesión de 83 KN/cm^2 y ángulo de fricción de 30.7° . Lo anterior supone un suelo firme a compacto.

En el análisis pseudoestático se evidencia que, al ingresar el sismo, en dos segmentos muy cortos del talud el software arroja dos factores de seguridad 0.684 y 1.04 el cual está por debajo de lo permitido por la norma que es $f_s = 1.05$, esto se debe a que en ese tramo puede ocurrir una falla en las bermas al momento de presentarse un sismo, por tal motivo se debe reforzar con geomantos y realizar un buen manejo hidráulico, o en su defecto realizar un perfilamiento de la zona mencionada

El agua infiltrada es considerada como uno de los principales factores desestabilizantes en taludes y laderas, por tal motivo resulta imprescindible realizar obras de protección y/o obras de drenaje.

En las bermas y pisos de los taludes se evidencian agrietamientos debido a la exposición directa del suelo a diferentes tipos de eventos climáticos, como fuertes lluvias, exceso de calor, vientos, entre otras los cuales generan socavación y esto puede cambiar la geomorfología del terreno, por ende, se recomienda la protección de los taludes lo más pronto posible.

4. Recomendaciones

Las recomendaciones consignadas en el presente informe se basan en los resultados de las investigaciones de campo y laboratorio que se describen en los capítulos pertinentes, en la magnitud del proyecto y en la caracterización geotécnica del área en estudio. De acuerdo a los resultados el talud será estable a corto plazo, pero se debería continuar con la construcción de las protecciones descritas en este informe.

La permeabilidad del suelo de textura limosa es media, el nivel freático NO se detectó superficialmente. Debido a la pendiente natural del terreno, las características y alta susceptibilidad de erosión de los suelos sub superficiales del sitio, se recomienda implementar obras permanentes para el apropiado manejo y control de las aguas lluvias, como también de la escorrentía en la zona, de tal manera minimizar posibles afectaciones de la obra, el talud presenta zonas con poco drenaje en el terreno, además debido a que es un suelo fino con permeabilidad media se podría apozar o no drenar.

Los factores de seguridad relacionados con la estabilidad del talud se aumentarán mediante el manejo adecuado de las aguas de escorrentía, estas obras desactivan la presión de poros en la masa de suelo del talud, y con esto se mitiga y reduce lo que en la mayoría de casos conduce a una disminución del esfuerzo efectivo del suelo.

De acuerdo al análisis de estabilidad, se recomienda la revegetación del talud como primera opción que puede ser temporal a definitiva, la cual debe ser inspeccionada periódicamente para evitar su desprendimiento y puntos sin cobertura vegetal, esto proporciona virtualmente una protección completa al suelo contra la erosión causada por la lluvia y demora la escorrentía, forma un colchón protector muy eficiente y la cobertura de las raíces evita la formación de cárcavas.

Referencias bibliográficas

- Aguilar, O. y Zuñiga, C. (2015). *Universidad de cartagena*.
<https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/2089/TRABAJO-DE-GRADO-FINAL.pdf?sequence=1>
- Alcaldia de Pasto. (2013). *Cauderno diagnostico gestión del riesgo, plan de ordenamiento territorial pasto, territorio con-sentido*. Pasto.
- Alcaldia de Pasto. (2015). *Cuaderno Diagnostico Ambiental Plan de Ordenamiento territorial Pasto, territorio con-sentido*. Pasto.
- Alcaldia de Pasto. (2020). Obtenido de <https://www.pasto.gov.co/>
- Avella Rodríguez, M. (2022). *Análisis comparativo de modelos digitales de terreno obtenidos por tecnología lidar con aeronave no tripulada y por fotogrametría con UAV en zona de montaña*. Universidad Antonio Nariño, Bogotá. <http://repositorio.uan.edu.co/handle/123456789/5967>
- Badillo, J. y Rodriguez, R. (2005). *Mecanica de suelos*. Limusa.
- Becerra Baeza, C. y Rurange Espinoza, J. (2021). Análisis de deslizamiento mediante técnicas UAV y LIDAR en ruta 115 CH, Paso Pehuenche, sector Monjes Blancos, Región del Maule, Chile. *Revista investigaciones geográficas*, 61, 87-98. doi:<https://doi.org/10.5354/0719-5370.2021.59646>
- Bermúdez Rivas, C., Álvarez Machuca, M. C. y Niño Pinzón, D. C. (2014). Caracterización de la geomorfología costera y sus coberturas vegetales asociadas, a través de sensores remotos, en la costa de Tumaco, Nariño. *Boletín Científico CIOH*, 27-46. https://www.researchgate.net/figure/Figura-6-Modelo-de-elevacion-de-terreno-de-la-costa-de-Tumaco-Narino_fig1_325632051

Bojorque Iñiguez, J. (2011). Métodos para el análisis de la estabilidad de pendientes. *MASKANA*, 2(2), 3-19. doi:<https://doi.org/10.18537/mskn.02.02.01>

Braja, M. D. (2011). *Fundamento de ingeniería de cimentaciones*. CENGAGE Learning.

Castañeda Docuara, L. J. y Martínez Rodríguez, W. A. (2018). *análisis comparativo entre levantamientos topográficos convencionales de detalle versus tecnología LiDAR terrestre estacionaria, aplicada a deformaciones en estructuras de gran tamaño*. Tesis de pregrado, Universidad distrital francisco José de Caldas, Bogotá. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/14025/MartinezRodriguezWilmerAndres2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cebrian, J. y Mark, D. (1986). *Modelos topográficos digitales. Métodos cuantitativos en geografía: Enseñanza, investigación y planeamiento*.

Congreso de la República de Colombia. (2012). *Ley 1523 de 2012*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=47141>

Consejo Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres Pasto, CMGRD . (2023). *Estrategia Municipal de Respuesta a Emergencias* . Pasto.

Cruden, D. M. (1991). *A simple definition of a landslide: Bulletin of the International Association for Engineering Geology*. doi:10.1007/ BF02590167.

DJI Enterprise. (2023). *enterprose.dji*. <https://enterprise.dji.com/zenmuse-11>

Estrada Bautista, V. V. y Soberanis Bello, J. J. (05 de 2014). *Estabilidad de taludes en suelos*. <http://132.248.9.195/ptd2014/mayo/0712861/0712861.pdf>

Estrada, V. y Soberanis, J. (05 de 2014). *Estabilidad de taludes en suelos*. <http://132.248.9.195/ptd2014/mayo/0712861/0712861.pdf>

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.

Galvis Flores, J. (2016). *Monitoreo superficial de movimientos en masa, empleando tecnología LiDAR, relacionando la geología, topografía e información geotécnica del sitio*. Tesis para optar al título de magister en ingeniería civil, con énfasis en geotecnia. , Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá. <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/466>

Galvis Flores, J. A. (2016). *Monitoreo superficial de movimientos en masa, empleando tecnología LiDAR, relacionando la geología, topografía e información geotécnica del sitio*. Tesis para optar al título de magister en Ingeniería Civil con énfasis en Geotecnia, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá.

Garcia, J. L. y Biosca Tarongers, J. (2008). *Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre*. http://jllerma.webs.upv.es/pdfs/Leonardo_Tutorial_Final_vers5_SPANISH.pdf

Geoanálisis de Colombia. (2023). *Geoanálisis de Colombia S.A.S.* <https://www.geoanalisis.co/apiques-2/>

Geólogos, I. C. (17 de octubre de 2016). *Tierra y tecnología*. <https://www.icog.es/TyT/index.php/2016/10/slide-la-mejor-aplicacion-estabilidad-taludes/#:~:text=0-,%20es%20un%20software%20de%20an%C3%A1lisis%20de%20Estabilidad%20de%20Taludes,sensibilidad%2C%20probabil%3ADsticos%20y%20an%C3%A1lisis%20retrospectiv>

Geomatrix. (2017). Obtenido de <https://geomatrix.co/terratrac-trm/>

Geostru slope. (s.f.). Método de Spencer. https://help.geostru.eu/slope/es/index.html?metodo_di_spencer_.htm

- Geotecnico, G. S. (2023). *Fine*. <https://www.finesoftware.es/software-geotecnico/soluciones/analisis-de-estabilidad/>
- Gisasola, N. (2018). LiDAR: introducción a la tecnología. *Mapping*, 27(192), 56-63. <https://ojs.revistamapping.com/MAPPING/article/download/131/22>
- Gómez Betancourt, I., Gómez Betancourt , M. y Bertel Paternina, L. (2010). Uso de tecnología LiDAR en la evaluación de proyectos viales. *Ventana informática*, 23, 51-70.
- Gómez, A., Delgado, J. y Pérez, N. (2005). *Obtención de DTM y DSM mediante tecnología LiDAR. Aplicación al Río Ebro*. Sevilla. <http://ingegraf.es/pdf/titulos/COMUNICACIONES%20ACEPTADAS/T14.pdf>
- GRIPPLE. (2020). *Estabilización de taludes y control de la erosión: sistema Terra-Lock*. <https://www.gripple.com/media/3972/broc-civ-spa-pg.pdf>
- Gripple. (2023). Obtenido de <https://www.gripple.com/es-es/construccion-civil/anclaje-geomembranas/>
- Ibáñez, E., Gili, J., Dolz Ripollés, J. y Bayán , B. (2007). M.D.T. de precisión de la Marisma del P.N Doñana mediante LiDAR. *Revista del Instituto de Navegación de España*, 29, 14-25.
- IDIGER. (2022). Obtenido de <https://www.idiger.gov.co/rmovmasa>
- INGEOMINAS. (1991). *Geología de las plancha 429- Pasto escala 1:100.000*. Bogota.
- Jimenez Badillo, E. y Rico Rodriguez, A. (1957). *Mecánica de suelos II, tomo 2-Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos*. Mexico: Limusa Noriega Editores.
- Magdaleno, F. y Martínez, R. (2006). Aplicaciones de la teledetección láser (LiDAR) en la caracterización y gestión del medio fluvial. *Ingeniería Civil*.

https://oa.upm.es/38099/1/INVE_MEM_2006_207626.pdf

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*. Universidad Mayor de San Andres, La Paz. <https://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/30626>

Mariana, U. (19 de julio de 2022). *Universidad Mariana*. <https://www.umariana.edu.co/programas-profesionales.html>

Moreno Brotóns, J., Alonso Sarría, F., Gomariz Castillo, F. y Alonso Bernardo, D. (2010). Análisis y Validación de modelos digitales de elevaciones mediante datos lidar. *Tecnologías de la Información Geomgráfica: La información geográfica al servicio de ciudadanos*, 254-271. https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/66324/MORENO_BROTONS.pdf;jsessionid=4338781B386B75EE646B3FAA143B6760

Nisperuza Toledo, D. (2010). *Diseño y construcción de un sistema óptico de monitoreo atmosférico aplicado a la determinación de la capa límite atmosférica en la ciudad de Medellín*. Trabajo presentado para optar al título de Magister en Ciencias-Física, Universidad Nacional de Colombia, Medellín. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/3429/10951790.2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Normas y especificaciones 2012 INVIAS. (2012). Ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido. *Ensayo normal de penetración (SPT) y muestreo de suelos con tubo partido*. Colombia.

NSR-10. (2012). *Titulo H, Estudios geotecnicos*. Colombia.

Ojeda-Pardo, F., Belete Fuentes, O. y Batista Legrá, Y. (2014). Elaboración del modelo digital de elevaciones mediante tecnología 3D láser escáner. *Minería y Geología*, 30(1), 95-103. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223531234007.pdf>

- Oliva González, A. O. (2015). *Instrumentación y control de taludes y laderas*.
https://www.researchgate.net/publication/324507431_Instrumentacion_y_control_de_taludes_y_laderas
- Plan Departamental de Agua de Nariño. (2020). *Plan de gestión del riesgo sector APSB departamento de Nariño*. Pasto.
- Pomares Almeida, D. M. y Rey Bravo, J. (2020). *Estudio de viabilidad técnica de alternativas no convencionales para obras de protección y contención de taludes en sitios críticos del casco urbano de la ciudad de cartagena*. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Civil., Universidad de Cartagena, Cartagena.
- Rengifo Buitrago, M. L. y Puentes Galindo, M. G. (2007). Penetración de la señal del sistema ALS40 LiDAR aerotransportado en la cobertura vegetal presente en las islas: La Viciosa y El Morro. *Boletín Científica Centro Control Contaminación del Pacífico (CCP)*, 14, 95-108.
<https://ojs.dimar.mil.co/index.php/CCCP/article/view/393/309>
- Rico Rodriguez, A. (2000). La ingeniería de suelos en las vías terrestres. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres*. Mexico: Limusa.
- Rincón, M. A., González Vergara, C. J. y Vargas Vargas, W. E. (2017). *Topografía: Conceptos y aplicaciones*. Bogotá: Ecoe ediciones.
- 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. <https://www.scielo.sa.cr/pdf/rgac/n51/a01n51.pdf>
- Salamanca Céspedes, J. E. y Pérez Castillo, J. (2008). LIDAR, una tecnología de última generación, para la planeación y desarrollo urbano. *Redalyc*, 11.
- Sanhueza Plaza, C. y Rodrigues Cifuentes, L. (2013). Análisis Comparativo de métodos de cálculo

de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. *SciELO*.

Sanhueza, C. y Rodriguez, L. (14 de 09 de 2013). Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales. Santiago, Chile.

Santos, L. J. (2005). Ortofoto verdadera (true-orto) y LiDAR, el posible futuro de la cartografía catastral urbana. *Catastro*, 131-154.

Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. Bogotá.

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25000*. Bogotá.

SGC. (2015). *Zonificación por velocidad de onda de corte a 30 m (Vs30) en la ciudad de San Juan de Pasto*. Bogotá.

SGC. (2023). *Sistema de información de Movimientos en Masa SIMMA*.
<https://simma.sgc.gov.co/#/public/>

Soria Molina, M. (2014). *Metodología para ejecución y control de calidad para ortofotos, mediante combinación de sensor digital con LiDAR en zonas rurales*. Tesis doctoral, Universidad Politecnica de Madrid, Madrid.
https://oa.upm.es/30860/1/BERZABETH_MADELEINE_SORIA_MOLINA.pdf

Suarez Dias, J. (20 de 05 de 2021). Análisis y estabilidad de taludes. Erosion.com.co.

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos. , Bucaramanga.

UNGRD. (2021). *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>

Universitat Politècnica de Catalunya. (s.f.).

<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/6529/05.pdf?sequence=6&isAllowed=y#:~:text=El%20m%C3%A9todo%20del%20equilibrio%20%C3%ADmite,as%C3%AD%20la%20rotura%20del%20terreno.>

Vanegas, A. F.y Flores, S. H. (2012). *Pontificia Universidad Javeriana*.

<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/11175>

Varnes, D. J. (1958). *Special report 29: Landslides and engineering*. Washington, D.C.: National Research.