



UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DE CUENCA

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL DESLIZAMIENTO EN EL SECTOR  
REINA DEL CISNE: MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y GEOTECNIA**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL**

**AUTORA: PAMELA CAROLINA PESÁNTEZ CABRERA**

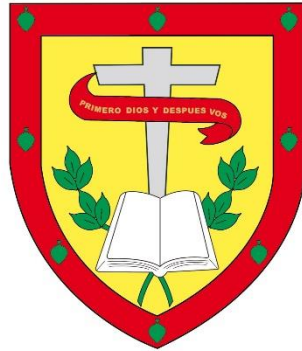
**DIRECTOR: ING. MARCOS GONZÁLEZ MALDONADO, MSc**

**CODIRECTORA: ING. SANDRA COBOS MORA, MSc**

**CUENCA - ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA**

*Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo*

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y  
CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL DESLIZAMIENTO EN EL SECTOR REINA  
DEL CISNE: MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y GEOTECNIA

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA CIVIL**

**AUTORA: PAMELA CAROLINA PESÁNTEZ CABRERA**

**DIRECTOR: ING. MARCOS GONZÁLEZ MALDONADO, MSC**

**CODIRECTORA: ING. SANDRA COBOS MORA, MSC**

**CUENCA - ECUADOR**

**2025**

**DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO**

## DECLARATORIA DE AUTORÍA Y RESPONSABILIDAD

**Pamela Carolina Pesántez Cabrera** portadora de la cédula N.º **010498873-8**. Declaro ser autora de la obra: “MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL DESLIZAMIENTO EN EL SECTOR REINA DEL CISNE: MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y GEOTECNIA”, sobre la cual se hace responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas.

Declaro que la misma ha sido elaborada respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de la investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 31 de marzo de 2025



F: .....

Pamela Carolina Pesántez Cabrera

010498873-8

## **CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS**

Yo, Ing. Marcos Darío González Maldonado con CI: 030208046-0 en calidad de director de tesis, certifico que el trabajo que lleva por nombre **"MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL DESLIZAMIENTO EN EL SECTOR REINA DEL CISNE: MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y GEOTECNIA"**, fue realizado por la estudiante PESÁNTEZ CABRERA PAMELA CAROLINA bajo mi supervisión.

Atentamente,

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



F: .....

Ing. Marcos González Maldonado, MSc

030208046-0

DIRECTOR

## **CERTIFICACIÓN DE CODIRECTORA DE TESIS**

Yo, Ing. Sandra Lucía Cobos Mora con CI: 010468206-7 en calidad de codirectora de tesis, certifico que el trabajo que lleva por nombre "**MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL DESLIZAMIENTO EN EL SECTOR REINA DEL CISNE: MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y GEOTECNIA**", fue realizado por la estudiante PESÁNTEZ CABRERA PAMELA CAROLINA bajo mi supervisión.

Atentamente,

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



F: .....

Ing. Sandra Lucía Cobos Mora, MSc

010468206-7

CODIRECTORA

## DEDICATORIA

A María, mi mamá, la roca más firme sobre la que he construido mi vida. Su amor y fortaleza son mi mejor sistema de contención, protegiéndome en cada deslizamiento de mi vida.

A Hernán, mi papá, mi mejor matemático, quien con paciencia y precisión me ha enseñado que, sin importar lo complicada que sea la ecuación, siempre hay una solución.

A Ramón, mi tío, un refuerzo esencial en mi estructura, siempre ahí para darme seguridad y equilibrio en cada nuevo desafío.

A Patricia, quien ha sido como un modelo de elevación, brindándome desde lo alto una vista del panorama y motivándome a seguir escalando.

A Paola, mi punto de control, quien con su cariño y compañía me ayuda a recalibrar el rumbo cuando las coordenadas parecen desajustarse.

A Mateo, cuya energía y curiosidad son como un radar, siempre en busca de nuevos horizontes, recordándome que siempre hay algo nuevo por descubrir.

A Paulina, como una imagen satelital, su visión del mundo es única, siempre mostrando nuevas perspectivas y oportunidades.

A Sebastián, que combina los colores como un mapa de teledetección. Cada uno de sus trazos revela un mundo lleno de creatividad y de misiones por dibujar.

A Valentina, tan pequeña como un primer dato captado por un sensor, pero con un brillo inmenso que promete revelar un mundo lleno de maravillas mientras crece.

Con cariño,

Pamela

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por ser mi luz y fortaleza en cada desafío, guiando mis pasos y dándome la determinación para alcanzar mis metas.

A mis padres, María y Hernán, por su amor incondicional, por mostrarme el valor del esfuerzo y la dedicación, y por ser mi mayor inspiración en este camino. A mi tío Ramón, quien, aunque ya no está físicamente, sigue siendo una brújula en mi vida, enseñándome con su ejemplo que los sueños se construyen con pasión y resiliencia.

A mis hermanas, Patricia y Paola, por su apoyo inquebrantable, por creer en mí incluso en los momentos en los que dudé de mí misma, y por ser un pilar fundamental en mi vida. A mis sobrinos, Mateo, Paulina, Sebastián y Valentina, porque con su alegría y curiosidad me recuerdan que el conocimiento es un viaje interminable y que siempre hay algo nuevo por descubrir.

A la Universidad Católica de Cuenca, por ofrecerme la formación académica y las oportunidades que han sido clave en mi crecimiento profesional.

A mi tutor, Ing. Marcos González Maldonado, por su paciencia, orientación y por compartir su conocimiento con benevolencia, impulsándome a desarrollar un trabajo de calidad. A mi cotutora, Ing. Sandra Cobos Mora, por su apoyo permanente y guía, por sus valiosas sugerencias y por alentarme a elaborar un trabajo excepcional. Al Ing. Juan Monge, técnico de laboratorio, por su disposición, asistencia y por hacer posible cada ensayo con su experiencia y conocimiento.

A cada docente y profesional que, de una u otra manera, contribuyó a mi formación y a la elaboración de este trabajo de titulación, mi más sincero agradecimiento.

Este trabajo es el resultado de muchas horas de dedicación, sacrificio y aprendizaje, pero, sobre todo, del respaldo de personas que han creído en mí y han estado acompañándome en este proceso. Este logro no es solo mío, es también de cada uno de ustedes.

Gracias de todo corazón,

Pamela

## RESUMEN

La investigación aborda la problemática de los deslizamientos de tierra en el sector Reina del Cisne, en la ciudad de Cuenca, Ecuador. Esta zona es susceptible a deslizamientos debido a su geografía montañosa, las precipitaciones estacionales y la actividad sísmica. El estudio utiliza un enfoque integrado en teledetección y geotecnia para analizar la tipología y cinemática de los deslizamientos, con el objetivo de mejorar la gestión del riesgo y la planificación territorial.

A través de análisis geotécnicos y geofísicos, se identificaron las características de los suelos y su comportamiento ante la infiltración de agua. Los resultados muestran que la saturación del suelo, combinada con la presencia de escarpes secundarios, contribuye a la inestabilidad de la ladera. Además, se observó que los suelos superficiales presentan una baja resistencia al corte, lo que aumenta la vulnerabilidad a los deslizamientos.

El uso de teledetección permitió obtener datos precisos sobre la morfología del terreno, los cuales fueron complementados con estudios geotécnicos y geofísicos para obtener una evaluación integral de las condiciones del suelo. Se recomienda implementar medidas correctivas, como el refuerzo de taludes y la mejora del drenaje, para prevenir futuros deslizamientos.

*Palabras clave:* Deslizamientos de tierra, teledetección, geotecnia, estabilidad del suelo, gestión del riesgo.

## **ABSTRACT**

The research addresses the landslide problem in the Reina del Cisne sector of Cuenca, Ecuador. This area is susceptible to landslides due to its mountainous geography, seasonal rainfall, and seismic activity. The study uses an integrated remote sensing and geotechnical engineering approach to analyze landslide typology and kinematics to improve risk management and land-use planning.

Through geotechnical and geophysical analyses, the characteristics of the soils and their behavior in response to water infiltration were identified. The results show that soil saturation, combined with the presence of secondary scarps, contributes to slope instability. Furthermore, it was observed that the surface soils have low shear strength, which increases their vulnerability to landslides.

Remote sensing provided accurate data on terrain morphology, which was complemented by geotechnical and geophysical studies to obtain a comprehensive assessment of soil conditions. Corrective measures, such as slope reinforcement and improved drainage, are recommended to prevent future landslides.

*Keywords:* landslides, remote sensing, geotechnical engineering, soil stability, risk management

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de Figuras .....	14
Índice de Tablas.....	16
Capítulo 1 : GENERALIDADES .....	17
1.1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN .....	17
1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO .....	19
1.2.1. Objetivo general .....	19
1.2.2. Objetivos específicos.....	19
Capítulo 2 : MARCO TEÓRICO .....	20
2.1. Movimiento de masa .....	20
2.2. Movimientos de masa en laderas.....	20
2.2.1. Movimientos de masa en laderas: Tipos y Clasificación .....	21
2.2.1.1. Desprendimientos de rocas.....	21
2.2.1.2. Avalanchas de detritos.....	21
2.2.1.3. Volcamiento o basculamiento .....	21
2.2.1.4. Reptación de suelos .....	21
2.2.1.5. Flujos de tierra y detritos .....	22
2.2.1.6. Deslizamientos rotacionales y translacionales .....	22
2.2.1.7. Hundimientos .....	22
2.2.2. Deslizamiento .....	24
2.2.3. Componentes de un deslizamiento .....	24
2.3. Factores Condicionantes y Desencadenantes .....	26
2.3.1. Factores Condicionantes.....	26
2.3.2. Factores Desencadenantes .....	27
2.4. Susceptibilidad a los Deslizamientos de tierra .....	27

2.4.1. Factores Utilizados en el Análisis de Susceptibilidad.....	27
2.5. Técnicas de exploración geotécnica .....	28
2.5.1. Métodos directos .....	28
2.5.1.1. Excavaciones y Pozos de Inspección .....	28
2.5.1.2. Ensayos geotécnicos para establecer parámetros físicos y mecánicos del terreno.....	28
2.5.1.2.1. Clasificación de Suelos: Sistema SUCS y Método AASHTO.....	29
2.5.1.2.2. Límites de Consistencia (Límites de Atterberg) .....	31
2.5.1.2.3. Corte directo.....	32
2.5.2. Métodos Indirectos .....	33
2.5.2.1. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) .....	34
2.5.2.2. ERT (Electrical Resistivity Tomography).....	35
2.5.2.3. ESAC (Extended Spatial Autocorrelation).....	35
2.5.2.4. Tomografía Sísmica.....	36
2.6. Teledetección.....	36
2.6.1. Escáner laser terrestre (LiDAR) .....	37
Capítulo 3 : DIAGNÓSTICO DEL PROYECTO .....	39
3.1. Zona de estudio .....	39
3.1.1. Ubicación geográfica.....	39
3.1.2. Geología .....	39
3.1.2.1. Formaciones del terciario .....	40
3.1.2.1.1. Formación Azogues (Maz) .....	40
3.1.2.1.2. Formación Mangán (Mm).....	41
3.1.2.2. Formaciones del cuaternario.....	44
3.1.2.2.1. Terraza aluvial .....	44
3.1.3. Hidrografía .....	46

3.1.4. Clima .....	46
3.1.5. Geomorfología.....	47
3.1.6. Sismicidad .....	48
3.1.7. Amenaza a deslizamientos .....	50
3.1.8. Acciones antrópicas.....	52
3.1.9. Construcciones afectadas.....	54
Capítulo 4 : METODOLOGÍA.....	56
4.1. Análisis tridimensional de nubes de puntos .....	56
4.1.1. Escáner laser terrestre.....	56
4.1.1.1. Levantamiento de nubes de puntos.....	58
4.1.1.1.1. Primer levantamiento .....	59
4.1.1.1.2. Segundo levantamiento.....	61
4.1.1.2. Herramientas informáticas aplicadas para el procesamiento de datos laser .....	62
4.1.1.2.1. Registro de escaneos .....	63
4.1.1.3. Tratamiento de nubes de puntos .....	64
4.1.1.3.1. Reducción de la densidad en la nube de puntos.....	65
4.1.1.3.2. Eliminación de ruido.....	67
4.1.1.3.3. Alineación de nubes de puntos .....	70
4.1.1.3.4. Extracción de secciones y perfiles .....	71
4.1.1.4. Generación de perfiles .....	73
4.1.1.4.1. Análisis de los perfiles extraídos .....	74
4.2. Análisis físico y mecánico de los suelos .....	77
4.2.1. Granulometría por cribado.....	77
4.2.2. Límites de consistencia o límites de Atterberg.....	78
4.2.2.1. Determinación del Limite liquido (LL).....	79

4.2.2.2. Determinación del Límite Plástico (LP).....	80
4.2.3. Ensayo de Corte Directo.....	81
4.2.4. Ensayo de Permeabilidad – carga variable.....	83
4.2.5. Ensayos Geofísicos (MASW, ESAC Y REMI) .....	85
4.3. Obtención del Factor de Seguridad (F.S.) de la ladera.....	86
Capítulo 5 : RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	88
5.1. Evaluación de las deformaciones de terreno .....	88
5.1.1. Perfil A-A' .....	88
5.1.2. Perfil B-B' .....	92
5.1.3. Perfil C-C' .....	96
5.2. Propiedades físicas y mecánicas del suelo .....	100
5.2.1. Límites de Consistencia.....	100
5.2.2. Clasificación de suelos .....	100
5.2.3. Ensayo de Corte Directo.....	101
5.2.4. Ensayo de Permeabilidad .....	102
5.3. Geofísica.....	103
5.4. Factor de seguridad en condiciones normales y con aceleración sísmica.....	106
Capítulo 6 : CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	108
Capítulo 7 : REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	112
ANEXOS.....	117

## Índice de Figuras

Figura 2-1. Tipos de deslizamientos de ladera .....	23
Figura 2-2. Partes de un deslizamiento.....	26
Figura 2-4. Límites de Atterberg .....	31
Figura 2-5. Ensayo para la determinación de límite líquido por medio de la cuchara de Casagrande.....	32
Figura 2-6. Máquina corte directo del laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Cuenca .....	33
Figura 3-1. Situación geográfica de la zona de estudio.....	39
Figura 3-2. Geología de la zona de estudio .....	46
Figura 3-3. Tipos de clima de la Parroquia Paccha .....	47
Figura 3-4. Mapa de pendientes .....	48
Figura 3-5. Mapa de máximas intensidades sísmicas del Ecuador .....	49
Figura 3-6. Zonas sísmicas para propósitos de diseño y valor del factor de zona Z.....	50
Figura 3-7. Mapa de amenaza a deslizamientos .....	51
Figura 3-8. Fotografías aéreas de la zona de estudio.....	53
Figura 3-9. Puntos de descarga directa de agua domiciliaria en la zona de estudio.....	53
Figura 3-10. Edificaciones en mal estado parte media de la zona de estudio .....	54
Figura 3-11. Edificación con agrietamiento deshabitada en la parte media del deslizamiento.....	55
Figura 4-1. Levantamiento en la zona de interés con el escáner FARO Focus3D X130	58
Figura 4-2. Objetivos de referencia para monitoreo.....	59
Figura 4-3. Ubicación de los escaneos con TLS en el primer levantamiento .....	60
Figura 4-4. Primer levantamiento en campo .....	60
Figura 4-5. Ubicación de los escaneos con TLS en el segundo levantamiento.....	61
Figura 4-6. Segundo levantamiento en campo .....	62
Figura 4-7. Ejemplo de eliminación de ruido en un modelo tridimensional de puntos..	69
Figura 4-8. Distribución puntos de alineación.....	71
Figura 4-9. Sección para la extracción de perfil.....	73
Figura 4-10. Mapa de sitios de extracción de muestras.....	77
Figura 4-11. Ensayo de Permeabilidad.....	84

Figura 4-12. Ejecución de ensayos geofísicos.....	85
Figura 5-1. Perfil A-A' primer levantamiento (10 de mayo 2023) .....	89
Figura 5-2. Perfil A-A' segundo levantamiento (19 de junio de 2023) .....	90
Figura 5-3. Perfil A-A', Primer levantamiento (Azul) vs. Segundo levantamiento (RGB) .....	91
Figura 5-4. Perfil B-B' primer levantamiento (10 de mayo 2023) .....	93
Figura 5-5. Perfil B-B' segundo levantamiento (19 de junio 2023) .....	94
Figura 5-6. Perfil B-B', Primer levantamiento (Azul) vs. Segundo levantamiento (RGB) .....	95
Figura 5-7. Perfil C-C' primer levantamiento (10 de mayo 2023) .....	97
Figura 5-8. Perfil C-C' segundo levantamiento (19 de junio 2023) .....	98
Figura 5-9. Perfil C-C', Primer levantamiento (Azul) vs. Segundo levantamiento (RGB) .....	99
Figura 5-10. Tomografía eléctrica, sector Reina del Cisne - Paccha .....	105
Figura 5-11. Tomografía sísmica, sector Reina del Cisne - Paccha.....	105
Figura 5-12. Velocidad vertical de ondas de corte, sector Reina del Cisne - Paccha...	105
Figura 5-13. F.S. de la ladera en condiciones normales de humedad (F.S. = 0.93) .....	107
Figura 5-14. F.S. de la ladera en condiciones normales de humedad con aceleración sísmica $K_h = 0,125$ y $K_v = 0,0625$ (F.S. = 0.6) .....	107

## Índice de Tablas

Tabla 2-1. Clasificación del suelo y símbolos de identificación .....	30
Tabla 3-1. Parámetros físico-mecánicos de la Formación Azogues.....	41
Tabla 3-2. Parámetros físico-mecánicos de la formación Mangán .....	43
Tabla 3-3. Parámetros físico mecánicos de la terraza aluvial.....	44
Tabla 4-1. Cantidad de puntos en densidad original y luego de reducción .....	67
Tabla 5-1. Resultados de ensayos de límites de consistencia.....	100
Tabla 5-2. Clasificación de suelos, sector Reina del Cisne - Paccha .....	101
Tabla 5-3. Resultados de ensayo de Corte Directo, sector Reina del Cisne - Paccha ..	102
Tabla 5-4. Resultados de ensayo de Permeabilidad, sector Reina del Cisne - Paccha.	103
Tabla 5-5. Parámetros geotécnicos mediante expresiones empíricas, sector Reina del Cisne - Paccha .....	104

## **Capítulo 1: GENERALIDADES**

### **1.1. INTRODUCCIÓN Y JUSTIFICACIÓN**

En Ecuador, los deslizamientos de tierra son una preocupación de suma importancia debido a su impacto devastador en la seguridad, infraestructura y medio ambiente. Con una geografía montañosa y diversidad climática, el país es especialmente propenso a estos eventos naturales, exacerbados por factores como la deforestación y el cambio climático (Correa Palacios et al., 2019). El área Reina del Cisne en Cuenca, posee un registro documentado de deslizamientos y una considerable importancia socioeconómica en la región. Es esencial entender a fondo la naturaleza y la dinámica de estos deslizamientos para la administración del riesgo y la planificación territorial, con la finalidad de atenuar su efecto y fomentar el desarrollo sostenible.

Este análisis sugiere una estrategia combinada de teledetección y geotecnia para tratar este problema. Mediante el uso de tecnologías avanzadas, el objetivo es conseguir información exacta acerca de la forma del terreno, la progresión temporal de los deslizamientos y las propiedades geotécnicas del suelo en la zona de la Reina del Cisne. A través de esta mezcla de técnicas, se busca proporcionar un panorama integral de los deslizamientos en la región, favoreciendo de esta manera la puesta en marcha de estrategias eficaces de mitigación y adaptación.

Esta investigación interdisciplinaria, fundamentada en la necesidad de fusionar saberes geológicos, geomorfológicos, climáticos, geotécnicos y tecnológicos, busca no solo aportar al saber científico sobre los deslizamientos de tierra en Ecuador, sino también a ofrecer datos útiles para la toma de decisiones en la administración del riesgo y la planificación territorial.

Las comunidades afectadas enfrentan un serio reto ante los deslizamientos de tierra, dado que causan daños considerables a la infraestructura, bloquean las rutas de comunicación, aniquilan cultivos e incluso afectan la salud de los residentes (Shen et al., 2021). La ciudad de Cuenca, situada en el imponente valle glacial de la Cordillera Andina, se encuentra asentada sobre diversas estructuras geológicas, como la formación de Azogues. Esta formación está compuesta principalmente de materiales volcánicos y sedimentarios, con una prevalencia de rocas ígneas y depósitos aluviales que, al igual que

en Cuenca, tienen una gran propensión a romperse y deslizarse (Gupta & Tiwari, 2019). La topografía de Reina del Cisne - Paccha es igualmente compleja, con una combinación de pendientes pronunciadas y suelos ondulados que, junto con la actividad sísmica y las lluvias estacionales, favorecen la inestabilidad del terreno (Smith et al., 2020).

Estas estructuras albergan materiales sedimentarios, delicados y propensos a fracturarse. Además, la ciudad se distingue por su variada morfología, con laderas y taludes que oscilan entre inclinaciones suaves y moderadas. El clima de la zona, con épocas de precipitaciones, funciona como un acelerador para sucesos catastróficos como los movimientos de masa (Thielen et al., 2015).

Esto requiere una caracterización detallada de estos procesos para obtener una mejor comprensión. Por lo tanto, el conocimiento de cómo y por qué ocurren los deslizamientos de tierra es esencial para planificar estrategias de control, prevención y contingencia. Asimismo, el análisis de susceptibilidad se vuelve realmente significativo ya que ayuda a razonar qué situaciones propician la aparición de un deslizamiento de tierra y el nivel de susceptibilidad del territorio a este fenómeno.

Por lo tanto, dado que no existe información disponible al público acerca de estos procesos, ni sobre la evaluación de susceptibilidad a procesos de movimientos en masa en los sectores de Reina del Cisne de Paccha, aunque es muy relevante prevenir la ocurrencia de estos eventos generados por movimientos en masa, especialmente cuando están ubicados en áreas de expansión urbana o productiva, y aún más en áreas de actividad minera, es necesario investigar este tema, dado el impacto que tiene en la población, la infraestructura y el medio ambiente (INEC, 2021; Zambrano-Molina et al., 2022). Cabe destacar que esta zona ya ha sido declarada susceptible a deslizamientos (MAGAP, 2018); sin embargo, los habitantes continúan viviendo allí y ampliando sus residencias, lo que incrementa el riesgo y la vulnerabilidad de la comunidad (Espinoza et al., 2020).

El objetivo del presente trabajo de titulación es crear estrategias eficaces para la prevención y reducción de riesgos que, al ser integrados en la realidad técnica y tecnológica, permitan comprender las características y condiciones que predominan en estos procesos en relación con su ocurrencia. Por lo tanto, se plantea el estudio: Monitoreo

y evaluación del deslizamiento en el sector Reina del Cisne: mediante Teledetección y Geotecnia.

## **1.2. OBJETIVOS DEL PROYECTO**

### **1.2.1. Objetivo general**

Caracterizar la tipología y cinemática del deslizamiento en el sector Reina del Cisne mediante un enfoque integrado en teledetección y geotecnia, con el fin de desarrollar estrategias efectivas de prevención y mitigación de riesgos.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Recopilar datos históricos sobre deslizamientos en el sector Reina del Cisne, con el fin de comprender las formaciones geológicas y condiciones climáticas de la zona que influyen en la ocurrencia de deslizamientos.
- Aplicar tecnologías LiDAR y de drones para mapear y monitorear el terreno afectado por el deslizamiento, para lograr analizar los datos geospaciales y geotécnicos obtenidos para identificar patrones y factores desencadenantes del deslizamiento.
- Evaluar la estabilidad del suelo y la susceptibilidad a deslizamientos utilizando modelos predictivos basados en los datos recopilados, con el propósito de crear estrategias de mitigación y prevención de deslizamientos, basadas en los hallazgos del estudio.

## **Capítulo 2: MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Movimiento de masa**

Los movimientos de masa son procesos geodinámicos que implican el desplazamiento de suelo, roca o escombros cuesta abajo bajo la acción de la gravedad, y pueden ser desencadenados por factores como la saturación de agua, sismos, erupciones volcánicas y actividades humanas (Dai et al., 2002). Estos fenómenos no se limitan a áreas montañosas; también pueden ocurrir en laderas costeras, donde los deslizamientos submarinos afectan la estabilidad de los márgenes continentales (Locat & Lee, 2002), así como en zonas urbanas con pendientes artificiales, como taludes de carreteras o cortes para edificaciones (Lee & Jones, 2014). Adicionalmente, regiones áridas no escapan a este riesgo, ya que eventos de lluvia intensa pueden desencadenar flujos de escombros en terrenos previamente estabilizados (Gutiérrez & Cooper, 2018). La presencia de estos procesos en múltiples sitios destaca la necesidad de un entendimiento y manejo contextualizado de tales procesos, que pueden tener efectos perjudiciales sobre las infraestructuras y comunidades.

### **2.2. Movimientos de masa en laderas**

Los movimientos en masa en laderas son uno de los procesos geomorfológicos más complejos asociados con el movimiento de una masa de tierra que puede ser rocosa o no consolidada, y está sujeta a las fuerzas de la gravedad. El fenómeno, también llamado deslizamientos de tierra, representa uno de los procesos más peligrosos en áreas montañosas y áreas geológicamente inestables, disparado por eventos como lluvias intensas, actividad sísmica o incluso intervención antrópica como la construcción de una presa (Crozier, 2010).

El análisis del movimiento de la tierra a lo largo de la ladera requiere un entendimiento multidisciplinario de los aspectos geotécnicos, hidrogeológicos y estructurales del terreno. El comportamiento del suelo o la roca en condiciones límite de humedad o estrés es un factor decisivo en la evolución de estos procesos (Hung et al., 2014).

### **2.2.1. Movimientos de masa en laderas: Tipos y Clasificación**

Con base en los mecanismos que los provocan y la naturaleza del material en movimiento, los movimientos de ladera pueden clasificarse en diferentes tipos. En ingeniería geotécnica, la clasificación común propuesta por (Varnes, 1978) clasifica los movimientos en seis tipos: desprendimientos de rocas, avalanchas, vuelcos, reptación, deslizamientos y flujos. Esta clasificación sigue siendo básica para el análisis de riesgos y para la mitigación de desastres naturales relacionados con deslizamientos de tierra.

#### **2.2.1.1. Desprendimientos de rocas**

Sus partes caen, en líneas verticales, en formaciones rocosas profundas, desgastadas por la erosión y los terremotos. Los desprendimientos de rocas se caracterizan por la caída de rocas desde acantilados o laderas empinadas y representan un gran peligro para las personas y estructuras debido a su alta velocidad y alta capacidad destructiva (Guzzetti et al., 2003).

#### **2.2.1.2. Avalanchas de detritos**

Estos movimientos son típicamente provocados después de lluvias intensas que saturan el suelo, reduciendo la cohesión interna del material y facilitando su desplazamiento. Las avalanchas de escombros a menudo tienen un muy alto poder destructivo, debido a su velocidad y al volumen movilizado, y pueden cubrir una amplia área (Iverson, 1997).

#### **2.2.1.3. Volcamiento o basculamiento**

El vuelco es un fenómeno de deslizamiento en el que capas de roca mayormente sedimentaria se inclinan o tambalean debido a la gravedad o fuerzas tectónicas. Así, las rocas se giran alrededor de su eje de rotación cuando se rompe el equilibrio de fuerzas internas (Aydan & Kawamoto, 1992). Una causa bien conocida en regiones con roca rotada ha causado deslizamientos de bloques.

#### **2.2.1.4. Reptación de suelos**

La reptación es un proceso de movimiento extremadamente lento que afecta principalmente a suelos no consolidados y a capas superficiales de sedimentos. Se caracteriza por deformaciones graduales y continuas que son casi imperceptibles a simple

vista, pero que, a largo plazo, pueden causar daños estructurales en edificaciones y otras infraestructuras (Smith et al., 2001). La reptación suele estar asociada a ciclos de humedecimiento y secado del suelo, así como a la acción de la gravedad en pendientes suaves.

#### **2.2.1.5. Flujos de tierra y detritos**

Los flujos de tierra se producen cuando materiales no consolidados pierden su cohesión debido al exceso de humedad. Estos movimientos son comunes en regiones donde el suelo está compuesto por arcillas o limos saturados, los cuales, bajo la influencia de precipitaciones intensas, superan su límite líquido (Iverson, 2000). Los flujos de detritos, por su parte, implican la movilización de partículas gruesas, como fragmentos de roca y vegetación, junto con lodo, creando movimientos altamente destructivos y de gran alcance.

#### **2.2.1.6. Deslizamientos rotacionales y translacionales**

Los deslizamientos pueden clasificarse en dos categorías principales: rotacionales y translacionales.

En los deslizamientos rotacionales, implican el movimiento a lo largo de una masa superficial curva que hace que el material desplazado gire. Estos deslizamientos ocurren típicamente en suelo eólico o poroso no saturado (Bromhead, 2013).

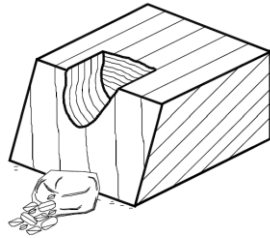
Por otro lado, los deslizamientos translacionales se caracterizan por el deslizamiento de una masa de suelo o roca a lo largo de una superficie plana o ligeramente inclinada. Este tipo de movimiento es más común en terrenos que tienen planos de debilidad, como fallas geológicas o capas sedimentarias poco cohesivas (Crosta et al., 2003).

#### **2.2.1.7. Hundimientos**

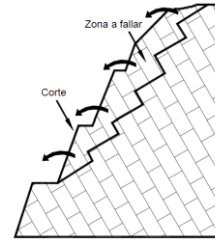
Los deslizamientos por hundimiento ocurren cuando el terreno pierde estabilidad debido a la pérdida de soporte estructural en el subsuelo, lo que provoca el colapso de la superficie. Estos deslizamientos son típicos en regiones con suelos propensos a la disolución como el yeso o la caliza o en zonas con cavidades subterráneas que producen un colapso abrupto (Crosta et al., 2003). Los factores causantes incluyen la saturación del

agua, aumento de presión en el suelo, o factores antropogénicos como la excavación o sobreexplotación de recursos naturales (Gutiérrez et al., 2008).

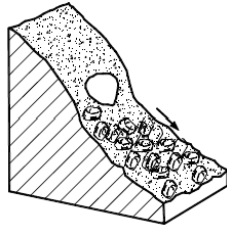
Figura 2-1. Tipos de deslizamientos de ladera



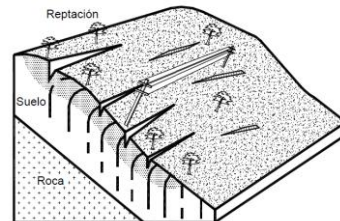
Desprendimientos de rocas



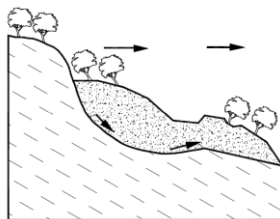
Volcamiento o basculamiento



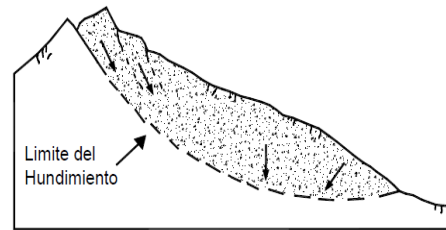
Avalanchas de detritos



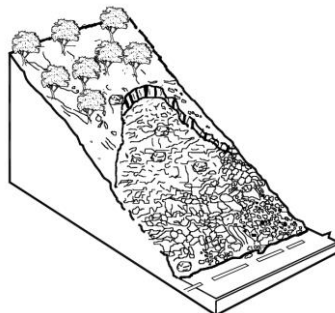
Reptación



Deslizamiento rotacional



Hundimientos



Flujo de tierra y detritos

Fuente: (Suárez, 1998)

### 2.2.2. Deslizamiento

Un deslizamiento es un fenómeno geológico, siendo un tipo específico de movimiento de masa que ocurre cuando una masa de suelo, roca o una combinación de ambos se desplaza ladera abajo bajo la acción de la gravedad. Los deslizamientos de tierra no son simplemente "eventos", sino eventos que pueden verse afectados por muchas variables, como la saturación del suelo, la intervención humana y el cambio climático.

Un deslizamiento de tierra es el movimiento de una masa de tierra por una ladera a lo largo de una superficie de deslizamiento, y puede proceder rápidamente o lentamente dependiendo del material y la cohesividad del material involucrado. El deslizamiento de tierra es otro movimiento en masa común que puede ocurrir de repente (después de lluvias intensas, terremotos y cambios repentinos en la estructura de la tierra) (Cruden & Varnes, 1996).

Se ha argumentado que, según el cambio climático, los cambios en los patrones de precipitación y temperatura están aumentando la frecuencia de los deslizamientos de tierra en numerosas partes del mundo. Los eventos de lluvia extrema aumentan dramáticamente los niveles de saturación del suelo, disminuyendo la cohesión de las partículas, lo que lleva al deslizamiento de masas de material (Guzzetti. et al, 2016).

Por el contrario, las acciones humanas como la deforestación, las excavaciones y el desarrollo urbano en laderas inestables también pueden desencadenar deslizamientos de tierra. Estas manipulaciones pueden perturbar el equilibrio de la tierra y aumentar el riesgo de colapso (Corominas & Moya, 1999).

### 2.2.3. Componentes de un deslizamiento

En términos estructurales, un deslizamiento se divide en varias partes, cada una de las cuales desempeña un papel crucial en el proceso de movimiento del terreno.

Un deslizamiento en las siguientes secciones clave (Cruden & Varnes, 1996):

**Cabeza:** La parte superior de la masa desplazada. El movimiento generalmente se inicia aquí debido a la inestabilidad del terreno.

**Escarpe principal:** La superficie inclinada que se forma en la parte posterior del deslizamiento, marcando el límite superior del área en movimiento.

**Superficie de falla:** El plano sobre el cual se desliza la masa de material. Este plano delimita el volumen del material desplazado y puede variar en profundidad y forma según el tipo de deslizamiento.

**Cuerpo del deslizamiento:** Aborda el material que se desliza por encima de la superficie de falla. Incluye la mayor parte de la roca, suelo o detritos que se desplazan ladera abajo.

**Pie de la superficie de falla:** La intersección entre la parte inferior de la superficie de falla y el terreno original. Es un punto clave para evaluar el alcance del movimiento.

Hung et al. (2005) añaden elementos clave para una clasificación más detallada:

**Corona:** El material inalterado que se encuentra por encima del escarpe principal. Representa la parte del terreno no afectada por el deslizamiento.

**Cima:** Comprende el punto más alto de la cabeza del deslizamiento, cuando el escarpe principal se encuentra en contacto con el material alterado.

**Escarpes secundarios:** Superficies inclinadas adicionales que se forman dentro del cuerpo en movimiento debido a desplazamientos diferenciales.

Wang et al. (2017) enfatizan la importancia de los siguientes componentes para un análisis completo:

**Base:** La región situada en la parte baja del deslizamiento donde el material perturbado se deposita después del movimiento. Es una zona de acumulación que puede albergar gran parte de los sedimentos.

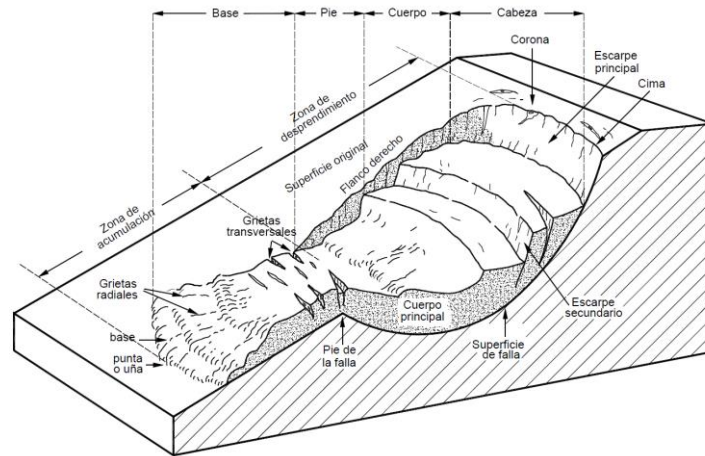
**Punta o ña:** El extremo más alejado de la base, donde se deposita el material al final del deslizamiento. Es un indicador del alcance del evento.

Highland y Bobrowsky (2008) sugieren incluir los siguientes elementos adicionales:

**Superficie original del terreno:** La topografía existente antes de que ocurriera el deslizamiento. Sirve como referencia para evaluar los cambios y deformaciones producidas por el movimiento.

**Costados o flancos:** Los lados del deslizamiento que delimitan lateralmente el movimiento. Pueden diferenciarse en flanco derecho e izquierdo, dependiendo de la perspectiva.

Figura 2-2. Componentes de un deslizamiento



Fuente: (Suárez, 1998)

## 2.3. Factores Condicionantes y Desencadenantes

Los deslizamientos de tierra y otros movimientos de masa son provocados por una combinación de factores condicionantes y desencadenantes. Los factores condicionantes incluyen las características geomorfológicas, geológicas y climáticas que predisponen a una ladera a sufrir un deslizamiento. Por otro lado, los factores desencadenantes son aquellos eventos que inician el movimiento, como las precipitaciones intensas o los terremotos (Highland & Bobrowsky, 2008).

### 2.3.1. Factores Condicionantes

Uno de los principales factores condicionantes es la pendiente del terreno. A mayor inclinación, mayor será la probabilidad de que el material pierda estabilidad. Además, el tipo de suelo juega un rol clave; los suelos arcillosos, por ejemplo, tienden a ser más susceptibles a los deslizamientos debido a su capacidad para retener agua y expandirse. La geología en la base es aún más vital, por lo que la existencia de debilidades como fallas y fracturas puede ayudar a dispersar las masas de tierra (Suárez, 2009).

### 2.3.2. Factores Desencadenantes

El factor desencadenante principal de los deslizamientos es la mayor saturación del suelo debido a la alta intensidad de las lluvias o a fases prolongadas de precipitación. Mientras que el agua se infiltra y hace que los terrenos se saturen, la resistencia al corte del suelo se reduce y el peso de la masa aumenta, haciendo que el desplazamiento sea más favorable. Los temblores, más a menudo en regiones montañosas donde están en riesgo de terremotos, son otro catalizador rutinario. La actividad sísmica induce vibraciones que pueden alterar la estabilidad en las laderas y pueden causar deslizamientos repentinos (Crosta & Agliardi, 2003).

### 2.4. Susceptibilidad a los Deslizamientos de tierra

El análisis de susceptibilidad a deslizamientos se refiere a todo lo relacionado con encontrar o detectar los parámetros geográficos que son responsables de la ocurrencia de deslizamientos de tierra en la región basados en algunas mesetas, hardware y condiciones montañosas. Este tipo de análisis es esencial para la gestión del territorio, ya que permite identificar las zonas más vulnerables y planificar medidas de mitigación adecuadas (Mora & Vahrson, 1992).

#### 2.4.1. Factores Utilizados en el Análisis de Susceptibilidad

El análisis de susceptibilidad considera varios factores, entre los cuales destacan:

**Pendiente:** Es uno de los parámetros más críticos en el análisis, ya que las pendientes pronunciadas son inherentemente inestables.

**Geología y tipo de suelo:** La presencia de suelos cohesivos o materiales no consolidados aumenta la probabilidad de deslizamientos.

**Uso del suelo:** Las áreas deforestadas o modificadas por actividades humanas suelen ser más susceptibles a los deslizamientos.

**Precipitaciones:** La cantidad y frecuencia de las lluvias son factores clave, especialmente en regiones tropicales o montañosas (Guzzetti et al., 2005).

## **2.5. Técnicas de exploración geotécnica**

Investigar y definir el subsuelo es necesario para detectar peligros geotécnicos en laderas y terraplenes. Hay dos categorías principales de técnicas de exploración geotécnica: métodos indirectos y directos.

### **2.5.1. Métodos directos**

Los **métodos directos** consisten en catas y zanjas que permiten la observación visual del suelo y el muestreo para análisis de laboratorio. Las primeras ofrecen datos fundamentales sobre las características físicas y mecánicas del suelo, como, por ejemplo, su cohesión, densidad y resistencia al corte (Terzaghi et al., 1996).

Entre los métodos de exploración directa aplicados en este estudio se encuentran:

#### **2.5.1.1. Excavaciones y Pozos de Inspección**

La exploración geotécnica directamente implica excavaciones e inspecciones de fosos que ayudan a visualizar las características del subsuelo. La mayoría de estas excavaciones, que pueden realizarse utilizando retroexcavadoras o manualmente a mano, permiten el acceso directo al suelo y se pueden extraer muestras para análisis de laboratorio y pruebas in situ (Tomlinson, 2001). Las muestras aisladas son necesarias para determinar parámetros físicos y mecánicos, que se utilizarán para diseñar y construir estructuras o rehabilitar el terreno afectado.

#### **2.5.1.2. Ensayos geotécnicos para establecer parámetros físicos y mecánicos del terreno**

Para caracterizar de manera precisa las propiedades físicas y mecánicas del suelo, se emplearon diversos ensayos en laboratorio:

- Clasificación de Suelos: Sistema SUCS y Método AASHTO
- Límite de consistencia (Límites de Atterberg)
- Corte directo

Los resultados de estudio de suelo que sustentan este estudio fueron obtenidos usando los siguientes ensayos:

### **2.5.1.2.1. Clasificación de Suelos: Sistema SUCS y Método AASHTO**

El **Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)** y el **método AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials)** son dos sistemas ampliamente utilizados en la ingeniería geotécnica para clasificar suelos según sus características físicas y mecánicas. Ambos sistemas ayudan a identificar las propiedades del suelo y su idoneidad para distintos tipos de proyectos de construcción, especialmente en infraestructura vial.

**Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS):** El Sistema de Clasificación Unificado de Suelos (USCS) es un sistema ampliamente utilizado para clasificar suelos según sus propiedades físicas y mecánicas, con un enfoque en la distribución de tamaño de partículas y la plasticidad de los suelos. Este sistema, originalmente desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, permite clasificar los suelos en dos grupos amplios: suelos gruesos, que son:

- Gravetas (G)
- Arenas (S)
- Limos (M)
- Arcillas (C)

La clasificación se complementa con descriptores adicionales que indican características específicas, como alta o baja plasticidad (H o L) y el porcentaje de partículas finas presentes en el material.

El método USCS utiliza técnicas que incluyen análisis de tamaño de grano (pasando datos a través de tamices o hidrómetros) y pruebas de plasticidad (como los límites de Atterberg) para evaluar las propiedades básicas del suelo. Comprender el comportamiento del suelo bajo diversas cargas, condiciones de consolidación y drenaje es crítico, ya que dicho conocimiento ayuda a los ingenieros a realizar diseños estructurales más seguros y apropiados. Por ejemplo, los granos y gravetas son generalmente más estables porque son menos compresibles, mientras que los suelos arcillosos son más problemáticos porque son altamente plásticos y pueden cambiar fácilmente con la adición de humedad.

Debido a que este sistema proporciona un lenguaje uniforme de comunicación entre profesionales, es ampliamente utilizado en obras de ingeniería civil como carreteras, cimientos y muros de contención. También señala posibles problemas relacionados con el suelo como expansión, contracción o asentamiento, todos los cuales son críticos para determinar la viabilidad de un sitio para un proyecto específico. El USCS ganó un uso generalizado debido a su flexibilidad y precisión, convirtiéndose en una herramienta importante y eficiente en la ingeniería geotécnica moderna (Coduto et al., 2011).

Tabla 2-1. Clasificación del suelo y símbolos de identificación

<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>
G	Grava
S	Arena
M	Limo
C	Arcilla
O	Limos orgánicos y arcilla
Pt	Turba y suelos altamente orgánicos
H	Alta plasticidad
L	Baja plasticidad
W	Bien graduados
P	Mal graduados

Fuente: (Das & Sivakugan, 2016)

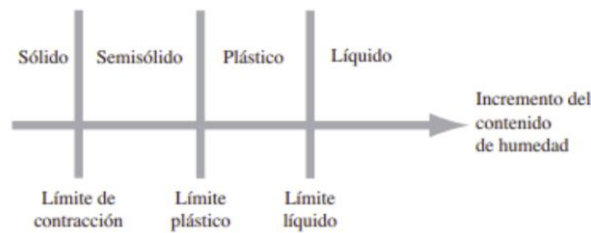
**Método AASHTO:** Utilizado principalmente en la construcción de carreteras y pavimentos, el sistema AASHTO clasifica los suelos según su tamaño de partículas y plasticidad en función de su idoneidad para soportar cargas de tráfico. Los suelos se clasifican en siete clases principales (A-1 a A-7), con subgrupos basados en el contenido de finos, plasticidad y características de drenaje. Por ejemplo, los suelos granulares clasificados como A-1 son adecuados para la construcción de carreteras, mientras que los suelos arcillosos clasificados como A-7 tienen alta plasticidad y menor capacidad de soporte de carga (Holtz & Kovacs, 1981).

Ambos sistemas proporcionan una base estandarizada para evaluar el comportamiento de los suelos en condiciones de carga, lo que resulta fundamental para el diseño de cimentaciones, la construcción de carreteras y otras obras de infraestructura.

#### 2.5.1.2.2. Límites de Consistencia (Límites de Atterberg)

Los límites de consistencia, también conocidos como límites de Atterberg, son parámetros clave que describen el comportamiento de los suelos finos (particularmente arcillas) en función de su contenido de agua. Al utilizar estos límites, los suelos pueden clasificarse según su capacidad para pasar entre diferentes estados físicos a medida que cambia el volumen de agua, información pertinente para comprender sus propiedades mecánicas y geotécnicas. Los límites de Atterberg consisten en el Límite Líquido (LL), el Límite Plástico (PL) y el Límite de Contracción (CL); sin embargo, los dos primeros se utilizan principalmente en el campo de la ingeniería geotécnica (Craig, 2004).

Figura 2-3. Límites de Atterberg



Fuente: (Das, 2015)

**Límite Líquido (LL):** El contenido de agua en la transición de líquido a plástico. La prueba de la copa de Casagrande es la que se utiliza para encontrar el límite líquido, que mide el número de golpes requeridos para cerrar un surco de 1.27 cm (0.5 pulgadas) cortado en el suelo después de 25 golpes. Esta restricción se refleja en la absorción máxima de agua del suelo hasta que actúa como un fluido espeso (Whitlow, 2001).

Figura 2-4. Ensayo para establecer el límite líquido usando la cuchara de Casagrande



Fuente: La Autora

**Límite Plástico (LP):** El contenido de humedad al cual el suelo comienza a comportarse plástico. Se mide enrollando una pequeña cantidad de suelo en un cilindro de aproximadamente 3 mm de diámetro. Se alcanza el límite plástico cuando el suelo comienza a agrietarse y no puede ser enrollado en cilindros recién. Este es uno de los parámetros importantes para determinar la ductilidad del suelo, es decir, la capacidad del suelo para deformarse sin fracturarse (Das, 2010).

**Índice de Plasticidad (IP):** El índice de plasticidad (IP) es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico ( $IP = LL - LP$ ). Un suelo con alto IP tiene una cantidad significativa de contenido de humedad donde exhibe comportamiento plástico. En la práctica, se ha demostrado que IP es útil para identificar suelos arcillosos muy plásticos, generalmente los problemáticos en estructuras (Holtz & Kovacs, 1981).

#### 2.5.1.2.3. Corte directo

La prueba es necesaria para encontrar la resistencia al corte del suelo para diferentes condiciones de carga. El suelo se mantiene en una caja de corte y se somete a fuerzas normales y de corte hasta que ocurre el fallo. Estos resultados se utilizan para caracterizar el sobre de resistencia al corte del suelo (Terzaghi et al., 1996).

Figura 2-5. Maquina corte directo en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Cuenca



Fuente: La Autora

#### 2.5.1.2.4. Ensayo de Permeabilidad

La prueba de permeabilidad del suelo es un procedimiento importante de control de calidad para identificar la capacidad de un suelo para permitir el paso del agua a través de él, con implicaciones significativas en muchos campos de la ingeniería, incluida la construcción, la hidrogeología y la agricultura (Head, 2006). La prueba se basa en la Ley de Darcy, que describe la relación del flujo de agua, el gradiente de presión y las permeabilidades del suelo (Darcy, 1856). La permeabilidad puede medirse utilizando varias técnicas diferentes, incluidas las pruebas de cabeza constante y cabeza decreciente para determinar el coeficiente de permeabilidad del suelo bajo condiciones controladas de laboratorio (Lambe & Whitman, 1979). Algunas aplicaciones comunes de la medición de la permeabilidad incluyen el diseño de edificios de cimientos, la gestión de aguas subterráneas y recursos hídricos, la estabilidad de infraestructura, así como la optimización de prácticas agrícolas (Boulanger & Seed, 1995).

#### 2.5.2. Métodos Indirectos

Los **métodos indirectos**, por otro lado, incluyen técnicas geofísicas como la tomografía eléctrica, el análisis de refracción sísmica y el análisis multicanal de ondas superficiales (MASW). Esto es esencial para detectar estratos débiles o localizar posibles

superficies de deslizamiento (Loke, 2000) ya que son técnicas no invasivas que permiten extraer información subsuperficial midiendo las propiedades físicas de las ondas sísmicas y electromagnéticas.

Los datos que sustentan este estudio fueron recolectados usando las siguientes metodologías:

#### **2.5.2.1. MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)**

El método MASW, o Análisis Multicanal de Ondas Superficiales, es una técnica ampliamente utilizada en la ingeniería geotécnica para la evaluación de las propiedades elásticas del subsuelo. Este método fue desarrollado por Park et al. (1999) y ha demostrado ser útil para la caracterización de suelos al observar la velocidad de propagación de las ondas superficiales (Gucunski & Woods, 2000). La matriz de geófonos para el MASW se instala en línea recta con un espaciamiento constante, que recibe la energía liberada por la fuente sísmica. Su principal propósito es obtener información de la velocidad de la onda de corte (onda S) con profundidad, que es información crucial sobre las propiedades mecánicas del suelo (Xia et al., 1999).

En el método MASW, se usa comúnmente una fuente activa como un martillo pesado unido a una placa de impacto. Esto genera ondas de sonido superficiales que se propagan a lo largo de la superficie del terreno y su exposición de la subsuperficie se capta por los geófonos. Mientras que hay fuentes más grandes disponibles que proporcionan ondas de mayor longitud de onda y menor frecuencia, la fuente del martillo y la placa base sigue siendo una solución práctica y de bajo costo para muchas aplicaciones (Miller et al., 1999).

El MASW usualmente emplea geófonos verticales de baja frecuencia (4.5 Hz). La disminución de la frecuencia en el MASW no se asocia con una pérdida significativa de calidad de datos, lo que permite adquirir información confiable, en comparación con otros métodos sísmicos (Ivanov et al., 2000). Este método es conocido por proporcionar una buena relación señal-ruido, limitando la interferencia del entorno y siendo más fuerte que otras mediciones directas de la onda de corte.

### **2.5.2.2. ERT (Electrical Resistivity Tomography)**

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (ERT, por sus siglas en inglés) es una potente tecnología de imágenes geofísicas que permite caracterizar el subsuelo basándose en las propiedades eléctricas del material. El método consiste en una inyección controlada de corriente eléctrica en el suelo y la medida del potencial que resulta de esta inyección, lo que permite obtener resistividad subterránea. Crea imágenes precisas en 2-D o 3-D, permitiendo el examen de la composición del suelo y la roca, la porosidad y el contenido de agua. Dado que la resistividad depende de la saturación, la salinidad del agua y el tipo de suelo, surgen una variedad de aplicaciones para la ERT que van desde la hidrogeología, el medio ambiente, la minería y los estudios geotécnicos (Loke et al., 2013).

El procedimiento típico del ERT suele consistir en una fila de electrodos que están conectados a un equipo de adquisición de datos que inyecta corriente y registra diferencias de potencial. Varias configuraciones de electrodos (Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo) permiten diferentes resoluciones y profundidades de exploración. Los datos recogidos se invierten a través de algoritmos que producen modelos de resistividad subterránea. Estos modelos pueden ser utilizados para identificar factores críticos, incluyendo la profundidad de acuíferos, la ocurrencia de contaminación y las estructuras geológicas. La ERT es una técnica importante en el análisis de problemas ambientales y geotécnicos complejos (Reynolds, 2011) ya que tiene la capacidad de proporcionar información detallada.

### **2.5.2.3. ESAC (Extended Spatial Autocorrelation)**

El método ESAC (Autocorrelación Espacial Extendida) se centra en el análisis del ruido ambiental registrado en múltiples puntos sobre la superficie del suelo. El método infiere propiedades subsuperficiales en términos de velocidad de la onda de corte a partir de las velocidades de las ondas superficiales medidas utilizando sensores colocados en toda el área de estudio (Yamanaka & Ishida, 1996). El modelo ESAC se basa en la asunción de que las señales registradas son representaciones de un proceso estocástico estacionario, del cual se puede obtener información útil en relación con la variabilidad espacial y temporal de los parámetros geotécnicos del terreno.

El ESAC es más adecuado para localizar fondos inaccesibles debido a las características estocásticas del ruido ambiental que permiten el análisis y la identificación de ondas superficiales de baja frecuencia que confinan las capas profundas del suelo (Okada, 2003). Esta técnica es particularmente relevante para estudios de sismología urbana ya que puede ser utilizada para caracterizar grandes regiones de terreno usando fuentes sísmicas pasivas, lo cual es frecuentemente necesario para evaluaciones de riesgo sísmico.

#### **2.5.2.4. Tomografía Sísmica**

La tomografía sísmica es una técnica geofísica utilizada para obtener imágenes tridimensionales del subsuelo mediante la interpretación de las velocidades de los tiempos de viaje de las ondas P y S. Las propiedades del medio (densidad, elasticidad, saturación de fluidos, etc.) influyen en las ondas (originadas por fuentes naturales o artificiales). Se emplean algoritmos de inversión para reconstruir modelos indicativos de la distribución de velocidad dentro del subsuelo, utilizando los tiempos de viaje medidos por geófonos o acelerómetros. Este método es de uso común en la ingeniería civil, la hidrogeología y los estudios de exploración de recursos, y demuestra el potencial para identificar capas de suelo, fracturas y estabilidad de estructuras.

La tomografía sísmica, a pesar de sus beneficios, está limitada por la resolución y el ruido de los datos, particularmente en áreas con gradientes de velocidad pronunciados. Sin embargo, avances como la tomografía sísmica de forma de onda completa han incrementado dramáticamente la fidelidad de los modelos desde entonces y ahora proporcionan algunos de los modelos más precisos disponibles. Además, su uso combinado con otros métodos geofísicos, como el análisis MASW y la tomografía eléctrica, lleva a interpretaciones más completas y fiables. Como tal, la tomografía sísmica es una herramienta poderosa para estos complejos problemas de caracterización del subsuelo (Sheriff & Geldart, 1995; Rawlinson & Sambridge, 2003).

### **2.6. Teledetección**

La teledetección se define como el acto de recuperar datos o conocimiento sobre un objeto o evento en la superficie del planeta (masa o superficie) sin contacto físico directo, a través de la radiación electromagnética, cuyo procesamiento se procesa y

captura mediante sensores. Permite el análisis de una variedad de procesos ambientales y geográficos utilizando imágenes de plataformas satelitales, aéreas o terrestres, facilitando aplicaciones como el monitoreo de desastres naturales, la cartografía de recursos naturales y los estudios del cambio climático (Jensen, 2007). Para un tipo de análisis dado, los sensores de teledetección pueden diseñarse para operar en diferentes bandas espectrales, como visible, infrarrojo, microondas y otras (Lillesand et al., 2015).

Existen dos tipos principales de teledetección: pasiva y activa:

- La teledetección pasiva depende de fuentes externas de energía, como la luz solar, y se utiliza para captar radiación reflejada o emitida por los objetos, siendo los sensores ópticos multiespectrales y térmicos ejemplos comunes.
- La teledetección activa emplea sus propias fuentes de energía —como microondas o pulsos láser para iluminar el objetivo y estudiar la energía que rebota. Este tipo incluye el conocido escaneo láser terrestre o LiDAR (Detección y Rango de Luz), cuyo principio de funcionamiento es medir distancias usando pulsos de luz láser para crear modelos tridimensionales de alta precisión del terreno o las estructuras (Zhang et al., 2018). Esto permite un rango particularmente amplio de posibles análisis en muchas disciplinas, desde la mitigación de riesgos hasta la planificación urbana.

### **2.6.1. Escáner laser terrestre (LiDAR)**

El escaneo láser terrestre, también conocido como LiDAR terrestre (TLS), se basa en el principio del LiDAR aerotransportado (ALS). En lugar de montarse en una aeronave, este dispositivo se coloca sobre un trípode en la superficie y emite pulsos de luz para mapear el área de interés. Dado que también está diseñado para instalarse en el suelo, también se le conoce como "Tecnología LiDAR Basada en Tierra".

Se crea una nube de puntos tridimensional para imitar la región escaneada porque el escáner láser devuelve información que incluye distancias, ángulos e intensidades de los puntos en los que el láser impacta (Arco, 2010). Esta técnica se caracteriza por su alta precisión y repetibilidad, permitiendo captar pequeños detalles y áreas extensas. En general, el equipo se ubica en un punto estático, por lo que es relativamente sencillo de usar ya que no involucra un sistema de posicionamiento inercial. Las coordenadas

absolutas con el escáner son factibles si se tiene un dispositivo de referencia como GPS, sin embargo, también es posible operar sin este dispositivo con coordenadas relativas.

Los usos de esta tecnología son variados, desde la investigación geológica y la conservación del patrimonio cultural (Delacourt et al., 2007). hasta la creación de modelos digitales del terreno. Por ejemplo, en el campo geológico, se ha utilizado mucho para el análisis de deslizamientos de tierra, caracterizando y monitoreando los movimientos en pendientes inestables para facilitar evaluaciones de riesgo y planificación de mitigación (Abellán et al., 2010). La misma técnica se utilizó para medir desplazamientos en pendientes activas, en las cuales el LiDAR ha demostrado ser una herramienta precisa para mapear la deformación a escala centimétrica (Teza et al., 2008). Destacan la importancia de poseer escáneres de alta precisión y largo alcance (500-1000 metros). Sin embargo, también subrayaron la posibilidad de usar esta tecnología para terrenos menos inclinados, si se realizan más escaneos (Palenzuela et al., 2013). Estos ejemplos destacan las ventajas que la teledetección activa puede ofrecer para el monitoreo de procesos geomorfológicos complejos y la evaluación de peligros por movimientos de masa.

Utilizando TLS, es posible generar un modelo digital de superficie (MDS) de forma eficiente y rápida. La recopilación de datos se realiza directamente en el lugar de trabajo, aunque las principales restricciones son la ampliación del espacio escaneado y los obstáculos en superficies con baja inclinación. En el manejo de datos, surgen desafíos parecidos a los del LIDAR aéreo, tales como la coordinación de las capturas y la supresión de componentes indeseables del modelo digital del terreno (MDT). Sin embargo, el resultado es bastante favorable, ofreciendo un MDS y un MDT de gran exactitud y resolución. Usualmente, se llevan a cabo varios escaneos desde distintas ubicaciones para prevenir zonas sombrías. Cada conjunto de puntos se adapta a su sistema de coordenadas y posteriormente se combinan en lo que se conoce como "pipeline 3D" (Bernardini & Rushmeier, 2002).

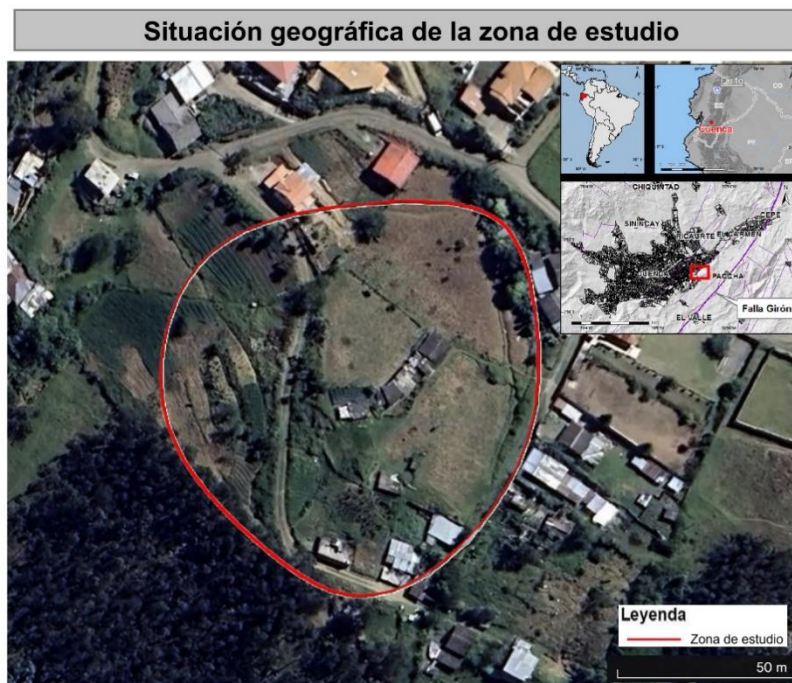
## Capítulo 3: DIAGNÓSTICO DEL PROYECTO

### 3.1. Zona de estudio

#### 3.1.1. Ubicación geográfica

La zona de estudio y deslizamiento se ubica al sur del Ecuador, en la provincia del Azuay, al sur de la ciudad de Cuenca (Figura 3-1), en el sector “Reina del Cisne” de la parroquia Paccha con coordenadas WGS84 UTM 17S, 726775 m E y 9679327 m N y a 2550 msnm.

Figura 3-1. Ubicación geográfica de la zona de estudio



Fuente: La Autora

#### 3.1.2. Geología

La zona de estudio (Figura 3-2), se ubica principalmente en la Formación Azogues (Terciario), además, se encuentra cerca de la formación Mangán (Terciario) y Terrazas aluviales (QT 1-5).

De acuerdo al proyecto PRECUPA (Basabe, P., et al., 1998), se describen las características de cada formación de la siguiente manera:

### **3.1.2.1. Formaciones del terciario**

#### **3.1.2.1.1. Formación Azogues (Maz)**

**Afloramiento:** Está presente en toda la cuenca sedimentaria, en las ramificaciones del anticlinal de Cuenca, el sinclinal de Azogues y el de Cruz Loma. En la autopista Cuenca - Azogues, en la sección de El Descanso, se observan extensas cortes en las areniscas de la Formación Azogues.

**Litología:** Tradicional secuencia sedimentaria, areniscas tobáceas de grosor medio a grueso café amarillentas, cubiertas por capas de lutitas, limolitas y escasas intercalaciones de conglomerados. Están presentes moluscos y restos vegetales.

**Espesor y tectónica:** En el centro oeste, su espesor se estima en 600 metros. Formación perjudicada por deformaciones post-sedimentarias, unida con fuerza y fallos.

**Edad y génesis:** Las últimas fechas de las trazas de fisión establecen la edad del Mioceno Medio-Tardío. Algunas estructuras sedimentarias, como ripples oscilantes, laminación cruzada, marcas de herramienta y canales rellenos de conglomerados, señalan depósitos en un entorno deltaico.

#### **Comportamiento geotécnico**

**Condiciones geodinámicas:** Los derrumbes y caídas de bloques son características habituales de esta formación en suelos con inclinación pronunciada (condición morfológica), donde los deslizamientos implican principalmente la superficie fina inapta de los sedimentos Azogues, además de los sedimentos de la Formación Loyola bajo condiciones saturadas (condición geológico-geotécnica).

**Condiciones estructurales:** Las areniscas conglomeráticas muestran fracturas moderadas con juntas cerradas a abiertas, revestidas de arena y con bordes rugosos deléznales. Por otro lado, las tobas y limolitas muestran fracturas severas con juntas cerradas a abiertas < 10 mm, revestidas de limo arenoso y bordes suaves y oxidados. Las estructuras desempeñan un papel crucial en el derrumbe de bloques.

**Condiciones hidrogeológicas:** Permeabilidad media a alta por fracturación. Macizos poco húmedos a secos.

Comportamiento geotécnico, en resumen: Macizos competentes, categorizados como rocas IV-III estables, se encuentran en pendientes superiores a 30°, con la caída de bloques en pendientes intensas o taludes de corte. Algunos niveles lutíticos muestran una conducta poco eficiente y pueden reducir su resistencia al corte en condiciones húmedas mediante planos de debilidad preferidos. Alta expansibilidad en materiales de Azogues retrabajados.

Tabla 3-1. Parámetros físico-mecánicos de la Formación Azogues

CLAS. SUCS	PARÀMETROS FÌSICO-MECÀNICOS							CLAS. Bieniawski
	K (m/s)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	C' (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	C <sub>u</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi_u$ (°)	$\sigma_c$ (MN/m <sup>2</sup> )	
-	10 <sup>-4</sup> – 10 <sup>-6</sup>	13 – 26	0.1 - 0.15	35 – 45	-	-	-	III
-	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-8</sup>	19 - 21	0.05 – 0.1	30	-	-	4.5	IV

*III: areniscas y conglomerados*

*IV: facies finas: tobas y lutitas*

Fuente: (Basabe, P., et al., 1998)

### Susceptibilidad a terrenos inestables de la Formación Azogues

Moderada a baja. Macizos heterogéneos de baja a mediana susceptibilidad a terrenos inestables en fuertes pendientes. Son propicios a desprendimientos y caídas de bloques. Deslizamientos relacionados a la mayor fracturación del macizo en general y a la rotura de niveles de lutitas saturados de la misma formación o de la Formación Loyola.

#### 3.1.2.1.2. Formación Mangán (Mm)

Afloramientos: En Cuenca, desde el sur de Pacchamama, están cubiertos por la Formación Llacao, y hacia el norte, atravesando Déleg, hasta el oeste de Biblián.

Litología: Secuencia de limolitas, lutitas y areniscas finogranulares, en su parte inferior todos de color claro; en su parte media se encuentran lutitas asociadas con vetas de carbón; en la parte superior aflora una arenisca tobácea gruesa café, que se hace conglomerática hacia arriba (Bristow, 1973).

Espesor y tectónica: La Formación Mangán, en sí misma, tiene un espesor cercano a los 2.200 metros, (Bristow, 1980), en contraste con la Formación Turi y el Mb. Santa Rosa tiene un grosor de 700 metros.

La Formación Mangán es la secuencia más significativa y la primera de la serie más temprana de la cuenca sedimentaria de Cuenca. Esta secuencia se encuentra en contraposición con los depósitos antiguos de la cuenca, como el caso del contacto con la Formación Azogues que experimentó grandes deformaciones compresivas hace 9-8 Ma. No obstante, la Formación Mangán también sufrió daños, presentando ahora una ligera deformación y fallamiento.

Edad y génesis: Las recientes fechas de las trazas señalan que la Formación Mangán comenzó en el Mioceno - Tardío. El Autor mismo describe su origen como reservorios continentales deltaicos en un sistema de ríos meandriformes distal con áreas de inundación. Los geólogos del Instituto de Ciencias Geográficas (Bristow, 1973) hallaron ostrácodos en la Formación Mangán, lo que podría sugerir ingresos marítimos salobres a confirmar.

### **Comportamiento geotécnico**

Condiciones geodinámicas: Erosión y desplazamientos del suelo, particularmente cuando están expuestos. La saturación de los materiales finos es particularmente relevante, más que la inclinación. La alternancia de estratos capaces e incapacitados promueve la formación de superficies débiles.

Condiciones hidrogeológicas: Material con permeabilidad reducida debido a su restricción en la transmisibilidad. Los niveles freáticos de poca profundidad producen flujos paralelos en conexiones duraderas y específicas, como en el caso de las areniscas calcáreas.

Condiciones estructurales: Los materiales inaptos se muestran fragmentados, con uniones abiertas, líneas suaves y rellenos de arcilla. Los materiales aptos para concreciones calcáreas se fracturan de manera media (10 cm a 1 m), mostrando uniones cerradas a abiertas (<3mm) con bordes rugosos, oxidados y suaves. Hay una diversidad intermedia.

Capacidad de trabajo y posible utilización del material. Excavación sencilla con maquinaria de gran tamaño. Lutitas que reaccionan a la humedad, pueden ser utilizadas como rellenos en combinaciones con areniscas.

Tabla 3-2. Parámetros físico-mecánicos de la formación Mangán

CLAS. SUCS	PARAMETROS FISICO-MECANICOS							CLAS. Bieniawski
	K (m/s)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	C' (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	C <sub>u</sub> (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi_u$ (°)	$\sigma_c$ (MN/m <sup>2</sup> )	
ML - CL	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-8</sup>	* 18 - 21	*0.01 - 0.03	* 18- 26	0.03	7 - 15		V
SC	f(cemento)	* 21 - 22	* 0 – 0.15	* 30 - 35	-	-	* 3	III – IV

\* valores compilados y ensayados, el resto estimados a partir de las características físicas

*ML-Cl: facie fina fisil e incompetente*

*SC: facie granular*

Fuente: (Basabe, P., et al., 1998)

Comportamiento geotécnico, en resumen: En la alternancia finogranular dura-blanda de la Formación Mangán, predominan los estratos físciles (por ejemplo, lutitas), donde las condiciones de saturación reducen la resistencia al corte hasta el momento de la rotura; las roturas están restringidas por los estratos correspondientes. No obstante, en áreas dominadas por materiales físciles, todo el macizo puede estar envuelto en extensas áreas inestables cuando se generan grandes presiones en los poros.

### **Susceptibilidad a terrenos inestables de la Formación Mangán**

Alta. Una vez que la cobertura volcánica se ha desgastado, emergen las formaciones de la cuenca de Cuenca, iniciando grandes cambios del terreno a los que contribuyó la Formación Mangán debido a sus estratos ineficientes y la sobrecarga. En la actualidad, la Formación Mangán sigue siendo susceptible a movimientos del terreno debido a las condiciones señaladas, principalmente por la saturación de sus materiales físicos. Esta susceptibilidad se intensifica debido a un uso incorrecto y cortes incorrectos del terreno.

### 3.1.2.2. Formaciones del cuaternario

#### 3.1.2.2.1. Terraza aluvial

La terraza  $Qt_5$  se compone de estratos irregulares de arena, limo y depósito de agua aluvial de diversa potencia.

#### Comportamiento geotécnico

Condiciones geodinámicas: Las terrazas de depósito original se mantienen estables, excepto en sus taludes finales que pueden sufrir erosión y desprendimientos.

Condiciones hidrogeológicas: Niveles de agua freática poco a medios de profundidad. Los terrenos suelen ser impactados por corrientes de agua. En la terraza  $t_1$  se observa una elevada permeabilidad y niveles de agua cercanos. En las terrazas  $t_2$ ,  $t_3$ , y  $t_4$ , la permeabilidad es de alta intensidad, presentando niveles superficiales estáticos cercanos a la base del terreno y que pueden superar los 20 metros de profundidad. En la  $t_5$ , la permeabilidad es elevada, se conserva seca cuando se drena correctamente, manteniendo niveles estáticos profundos.

Trabajabilidad y posible uso del material: Mediana complejidad en la excavación, pueden ser operadas con maquinaria de liviana capacidad. Tiene problemas para trabajar a mano.

Comportamiento, en resumen: Depósitos aptos, permeables, mayormente friccionantes, adecuados para la edificación y un terreno de cimentación adecuado. Atención si están situados en taludes, presentan tendencia a desplomes.

Tabla 3-3. Parámetros físico mecánicos de la terraza aluvial

CLAS. SUCS	PARAMETROS FISICO-MECANICOS							CLAS. Bieniawski
	K (m/s)	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	$C'$ (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi'$ (°)	$C_u$ (MN/m <sup>2</sup> )	$\phi_u$ (°)	$\sigma_c$ (KN/m <sup>2</sup> )	
1) GW-SW	$10^{-4} - 10^{-5}$	21 - 22	0	35 - 45	-	-		
2) GW-SW y CL	$10^{-4} - 10^{-5}$	*19 - 21	0	35	-	-		

*Valores compilados y estimados a partir de características físicas.*

Fuente: (Basabe, P., et al., 1998)

## **Susceptibilidad a terrenos inestables de Formaciones del Cuaternario**

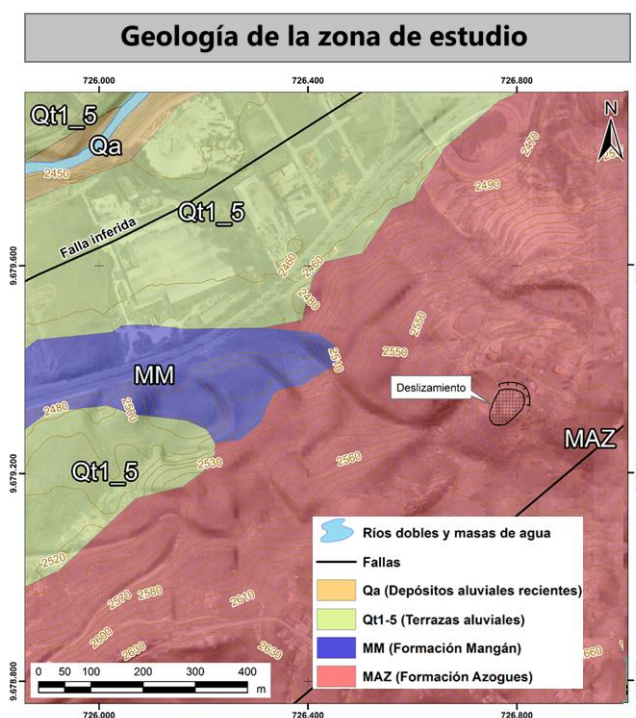
En las terrazas aluviales muy compactas y cementadas, los taludes naturales mantienen su estabilidad en pendientes bajas, a excepción de cuando se rompe la pendiente entre las terrazas o se dirige a los cauces naturales y cortes de talud, donde puede ocurrir socavación e inicio de inestabilidad con la caída de bloques y desplomes. Las terrazas suelen ser competentes, sin embargo, en los escasos casos de deslizamientos registrados, las causas primordiales son geológicas (desgarro de formaciones arcillosas saturadas a la base) y morfológicas (erosión en la base del talud y aumento de la pendiente al borde de las terrazas).

Las pendientes naturales pueden mantenerse estables hasta los 29°, sin embargo, pueden resistir taludes casi verticales de 25 metros de altura. No obstante, presta atención al descalce y las caídas próximas al talud. En general, se aconseja un talud de 1/3 (H/V) y la utilización de bermas.

En las áreas con mayor prevalencia de fluvio-glacial, las propiedades del material se asemejan a las terrazas, lo que les permite clasificarse como de baja probabilidad de desplom

Dado que las terrazas poseen su principal inestabilidad hacia los taludes del borde, es necesario fomentar una cultura de tratamiento de taludes, aplicación de cortes apropiados, bermas, supervisión del drenaje superficial con cunetas, plantación de vegetación autóctona y arbustos, además de establecer fajas de seguridad, entre otros. En situaciones especiales se necesitarán muros de soporte.

Figura 3-2. Geología de la zona de estudio



Fuente: La Autora

### 3.1.3. Hidrografía

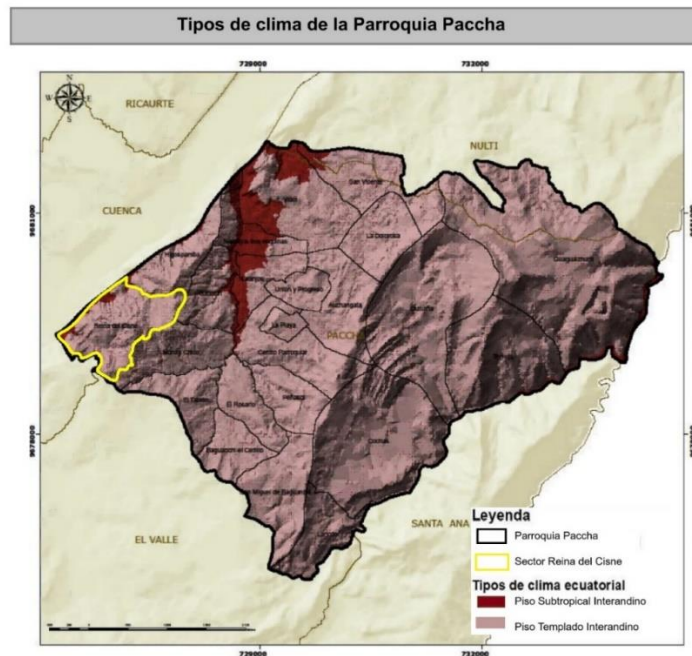
La zona de estudio se caracteriza por la presencia de varias quebradas y arroyos que alimentan el sistema hidrográfico local, el cual forma parte de la cuenca del río Machángara. Estas corrientes superficiales exhiben un comportamiento estacional, con caudales que aumentan significativamente durante la temporada de lluvias, lo que contribuye a la saturación del suelo en las laderas de la región. La topografía accidentada del sector y la inclinación de los cauces facilitan el escurrimiento rápido del agua, intensificando los procesos de erosión y aumentando la susceptibilidad a los deslizamientos de tierra (INAMHI, 2018). La combinación de estos factores convierte a la hidrografía del área en un elemento crucial para el análisis de riesgos geotécnicos y la planificación de medidas de mitigación de desastres en la zona (Ordoñez et al., 2020).

### 3.1.4. Clima

El área de estudio, corresponde al del piso Templado Interandino, que se caracteriza por temperaturas moderadas, fluctuando entre los 10 y 15 °C, y se encuentra en altitudes que van de los 2500 a los 3200 metros sobre el nivel del mar. Este clima

presenta un régimen de vientos estacionales: en la temporada lluviosa se observan vientos frecuentes y frescos, mientras que en la época seca los vientos son más fuertes y acompañados de un aire cálido y seco (García & López, 2017). Estas condiciones climáticas afectan la humedad y la estabilidad del suelo, haciendo que la región sea susceptible a la erosión y a deslizamientos de tierra durante los periodos de alta precipitación (Arévalo & Castillo, 2019). Así, el clima Templado Interandino se convierte en un factor importante para la planificación y prevención de riesgos en el sector Reina del Cisne.

Figura 3-3. Características climáticas de la Parroquia Paccha



Fuente: La Autora

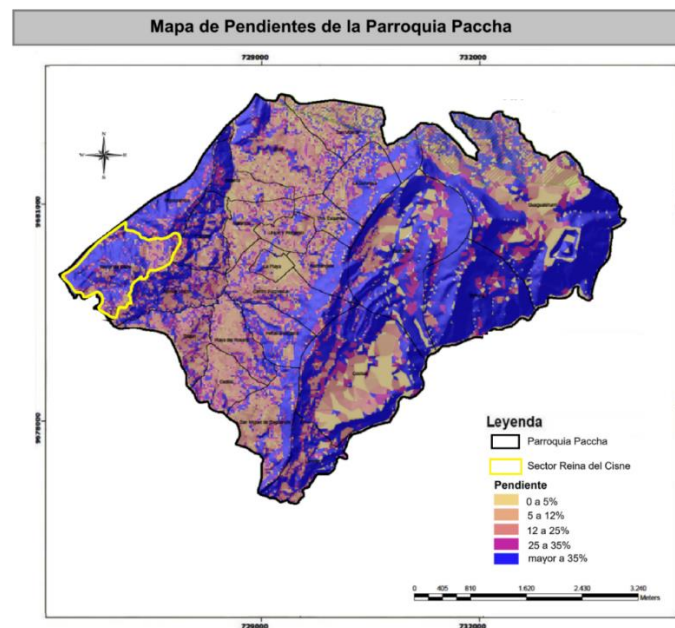
### 3.1.5. Geomorfología

La morfología que se presenta en la zona de estudio se caracteriza por una topografía abrupta, con pendientes que varían entre el 12% y más del 35% (Figura 3-4), lo que contribuye a la inestabilidad del terreno y la vulnerabilidad a movimientos de masa. Estas pendientes pronunciadas, típicas de la Cordillera de los Andes, generan un relieve complejo que incluye laderas empinadas y áreas onduladas. Intervenciones antrópicas, como el crecimiento urbano y la construcción de infraestructura, han modificado parcialmente la morfología original, alterando la estabilidad de algunas áreas mediante el

relleno de depresiones y la modificación de taludes para el desarrollo de viviendas y vialidades (IG-EPN, 2017).

Estudios recientes indican que el suelo en Reina del Cisne está compuesto principalmente de materiales volcánicos y sedimentarios (Vásconez & Yepes, 2019), lo cual, en combinación con las altas precipitaciones y la actividad sísmica de la región, incrementa la susceptibilidad del área a deslizamientos y otros movimientos de masa. Además, la vegetación local, que incluye especies como el eucalipto, desempeña un papel importante en la estabilización de ciertas pendientes. Sin embargo, la deforestación en algunas áreas ha exacerbado problemas de erosión y aumentado la propensión a inestabilidades del suelo, especialmente en las pendientes más pronunciadas (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2018).

Figura 3-4. Mapa de pendientes



Fuente: La Autora

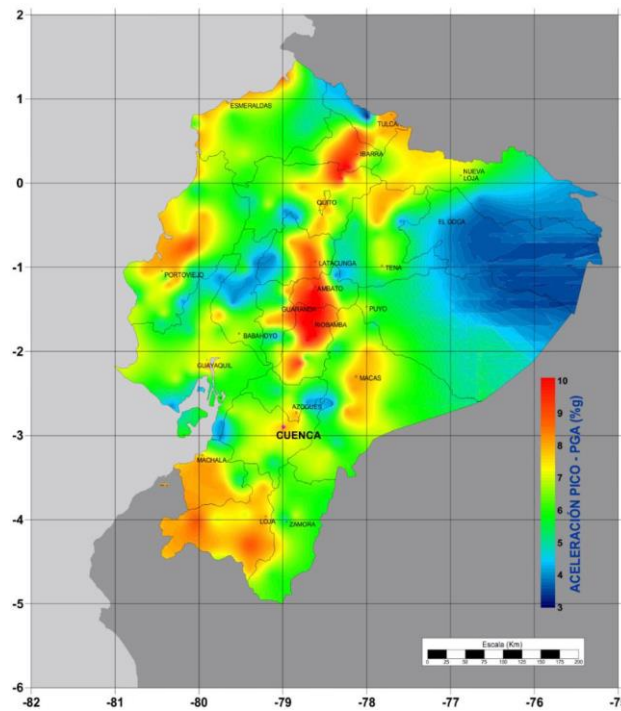
### 3.1.6. Sismicidad

En el mapa de intensidades sísmicas máximas de Ecuador (Singaicho, 2009), se observa que la ciudad de Cuenca puede experimentar aceleraciones sísmicas pico entre el 4.5 % y el 8.9 % de la gravedad ( $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ).

Al traducir estos valores a la escala de Mercalli modificada, se estima que los impactos sobre edificaciones e infraestructuras serían leves, con un potencial de daño mínimo. La Norma Ecuatoriana de Construcción categoriza el país en seis áreas de riesgo sísmico, cada una con un factor de zona (Z), que simboliza la aceleración máxima prevista en roca para el terremoto de diseño, expresada en términos de gravedad.

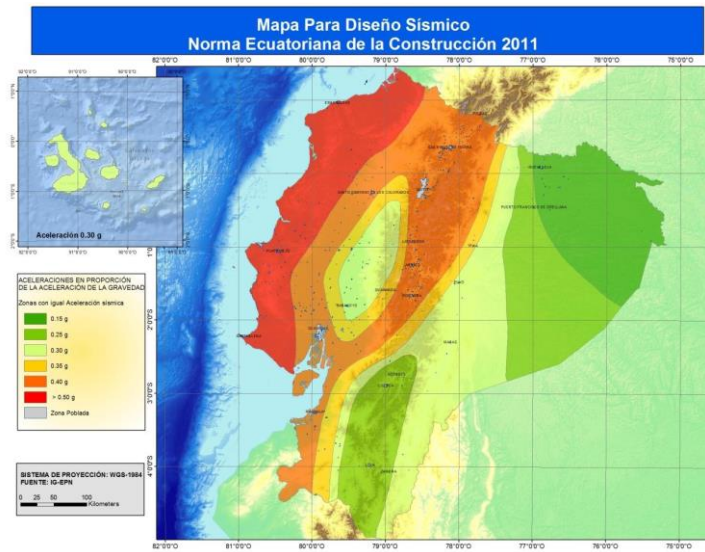
El mapa de zonificación sísmica utilizado para el diseño estructural (MIDUVI, 2015) fue elaborado a partir de un análisis de riesgo que considera un 10 % de probabilidad de excedencia en 50 años (o un periodo de retorno de 475 años). Este análisis determinó que la región del litoral ecuatoriano, asignada a la zona VI, tiene una aceleración máxima en roca de hasta 0.50g, mientras que para Cuenca se define un factor sísmico de diseño de 0.25g.

Figura 3-5. Mapa de intensidades sísmicas más elevadas en Ecuador



Fuente: (Singaicho, 2009)

Figura 3-6. Zonas sísmicas con fines de diseño y valor del factor de zona Z



Fuente: (NEC, 2011)

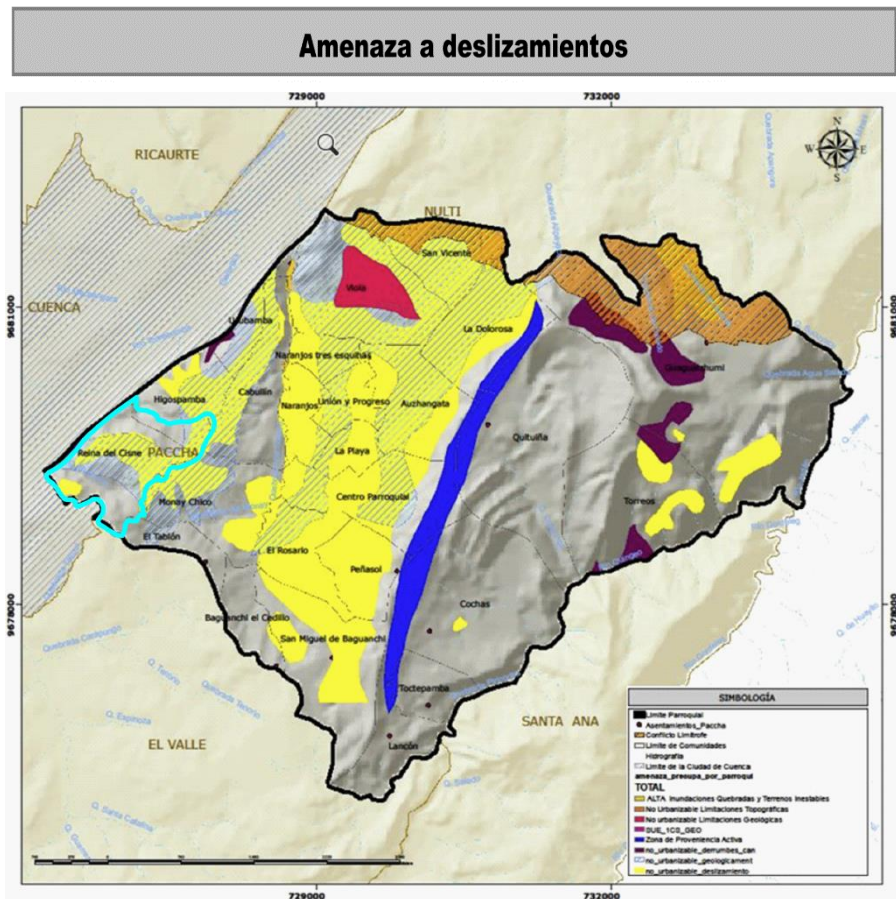
### 3.1.7. Amenaza a deslizamientos

La parroquia de Paccha, ubicada en el cantón de Cuenca, Azuay, enfrenta diversas amenazas geológicas que comprometen la seguridad de sus habitantes y la infraestructura local. Según el Plan de Ordenamiento Territorial de la Provincia del Azuay, el territorio presenta varias áreas de afección con riesgo muy alto debido a amenazas latentes como deslizamientos, derrumbes o caídas de rocas, que ponen en peligro a sectores con presencia de infraestructura y población, convirtiendo el área en una zona de alto riesgo inminente para la vida de los habitantes y el transporte en las vías (GAD Azuay, 2015). Al mismo tiempo, el sector Reina del Cisne ha sido destacado como una zona de riesgo de deslizamientos de tierra. Un estudio realizado en marzo de 2018 analizó un deslizamiento de tierra en esta área, el cual fue desencadenado por un corte en la ladera para la construcción de una vía, evidenciando la susceptibilidad del terreno a movimientos de masa (González et al., 2021).

Además, el Proyecto de Recuperación de la Cuenca del Río Paute (PRECUPA) ha identificado áreas de alto riesgo en la provincia de Azuay con la Parroquia de Paccha. Esta es la rehabilitación y conservación de cuencas hidrográficas y está destinada a mitigar riesgos de desastres naturales, incluidos deslizamientos de tierra y erosión del suelo (GAD Azuay, 2015).

La combinación de factores geológicos, como la topografía accidentada y la actividad sísmica en la región, junto con la intervención humana en la construcción de infraestructuras, incrementa la vulnerabilidad del sector Reina del Cisne a deslizamientos y otros fenómenos geológicos.

Figura 3-7. Mapa de amenaza a deslizamientos



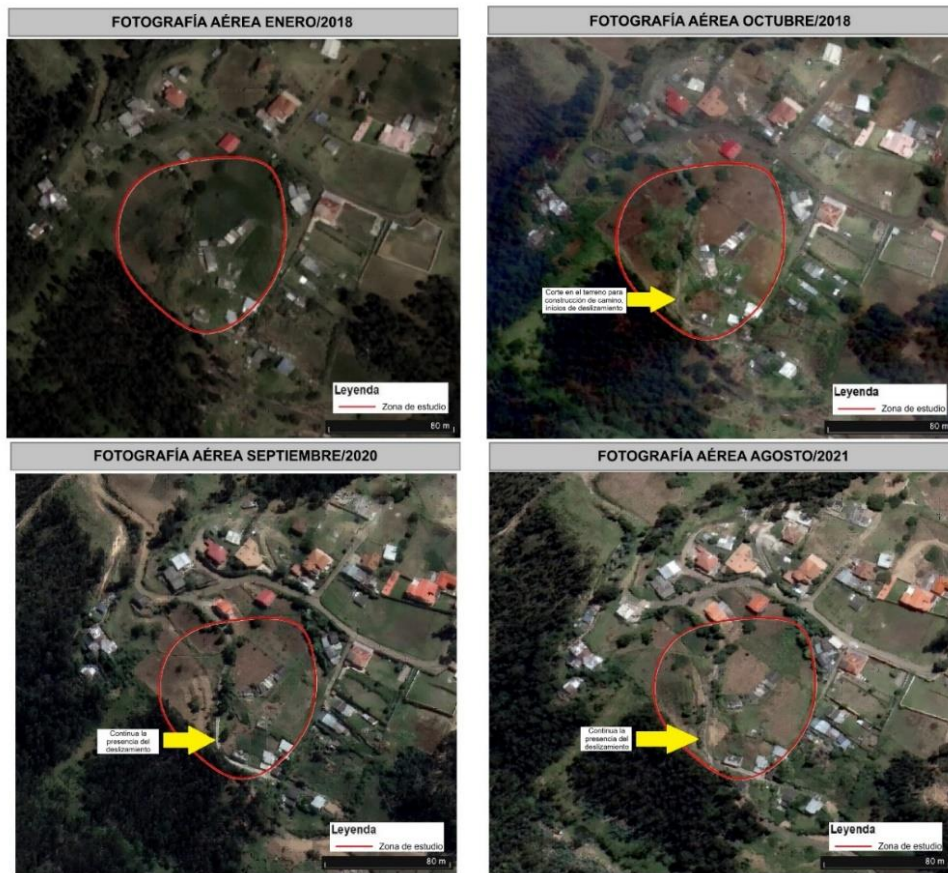
Fuente: La Autora

### **3.1.8. Acciones antrópicas**

La geomorfología del sector Reina del Cisne en la parroquia Paccha de Cuenca ha sido significativamente alterada por diversas acciones antrópicas. Según datos históricos; entre los años 2018 y 2019, un morador de la zona realizó excavaciones y cortes en el terreno sin emplear técnicas adecuadas ni considerar estudios geotécnicos previos, lo que generó condiciones de inestabilidad en las pendientes. Estas intervenciones han afectado la cohesión natural del suelo y disminuido su resistencia frente a la erosión y a movimientos de masa, incrementando el riesgo de deslizamientos en la zona (García et al., 2020). Además, los habitantes del sector han reportado que durante las épocas de lluvias intensas el terreno suele presentar deslizamientos y desprendimientos de material, una situación que se ha agravado por la deforestación y la ausencia de sistemas de drenaje adecuados (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2019). Este impacto antrópico en la estabilidad del suelo resalta la importancia de realizar intervenciones bajo supervisión técnica en áreas con pendientes pronunciadas y suelos susceptibles.

En la zona de estudio se ha identificado la descarga directa de aguas residuales desde los domicilios hacia el terreno, lo que está generando una saturación progresiva del suelo. Esta condición afecta su compactación y favorece la remoción de partículas finas, dejando espacios vacíos que con el tiempo provocan asentamientos diferenciales. Igualmente, la infiltración continua de estas aguas puede debilitar los estratos superficiales hasta alcanzar capas más compactas, donde eventualmente se podrían formar planos de falla, aumentando el riesgo de movimientos de masa a largo plazo.

Figura 3-8. Fotografías aéreas multi-temporales de la zona de estudio



Fuente: La Autora

Figura 3-9. Puntos de descarga directa de agua domiciliar en la zona de estudio



Fuente: La Autora

### 3.1.9. Construcciones afectadas

En el sector Reina del Cisne, se han identificado un total de 54 predios, de los cuales 8 son terrenos baldíos. Según un informe técnico de evaluación de infraestructura en la zona (Municipio de Cuenca, 2020), se hallaron 28 edificaciones con daños estructurales significativos, de las cuales 9 están completamente demolidas debido a la inestabilidad del terreno. A pesar de las condiciones, 4 viviendas aún están habitadas, y en 15 se han observado signos claros de desplazamientos y grietas en muros y pisos. Además, el informe señala que 18 familias han sido reubicadas a otras áreas más seguras debido al riesgo que representa el sector, especialmente durante la temporada de lluvias intensas, cuando el terreno se vuelve más susceptible a deslizamientos y colapsos parciales de estructuras.

Figura 3-10. Construcciones deterioradas en la parte central de la zona de estudio



Fuente: La Autora

Figura 3-11. Construcción con agrietamiento deshabitada en zona media del deslizamiento



Fuente: La Autora

## Capítulo 4: METODOLOGÍA

### 4.1. Análisis tridimensional de nubes de puntos

El estudio tridimensional de las nubes de puntos se realizó evaluando las variaciones en la altura y los movimientos horizontales en el suelo y las estructuras de la región de investigación. Este estudio se llevó a cabo a través de tres perfiles concretos obtenidos de las nubes de puntos, incluyendo un análisis minucioso de viviendas que presentaban deformidades considerables. Estos datos se lograron después de finalizar varios procedimientos esenciales, los cuales se describen a continuación.

#### 4.1.1. Escáner laser terrestre

Hay dos clases fundamentales de escáneres láser terrestres (TLS en inglés): los que operan mediante el método de tiempo de vuelo y los que utilizan el desfase de ondas. El modelo **TLS FARO Focus3D X130** pertenece a la segunda categoría, empleando un sistema de medición basado en el desfase de ondas. Este tipo de escáner láser terrestre presenta las siguientes características:

- El sistema emite un láser en un pulso continuo que se refleja en la superficie del objeto que se está escaneando. La distancia se determina al comparar la diferencia entre la onda emitida y la onda reflejada, lo cual facilita una precisión elevada en la medición.
- El tiempo de vuelo se calcula con la fórmula:

$$\text{Tiempo de vuelo} = \frac{\text{Desfase}}{2 \times \text{frecuencia de onda}}$$

que permite determinar con exactitud el tiempo que tarda la luz en ir y volver al escáner (Gordon & Lichti, 2007).

- La distancia al objeto escaneado se determina usando la fórmula:

$$\text{Distancia} = \frac{\text{velocidad de la luz} \times \text{timepo de vuelo}}{2}$$

donde la velocidad de la luz es un factor constante en el cálculo (Vosselman & Maas, 2010).

- El escáner es capaz de capturar cientos de miles de puntos por segundo, lo que le permite crear representaciones tridimensionales detalladas del entorno en poco tiempo (Lemmens, 2011).
- Este dispositivo puede trabajar a una distancia de 0.6 a 350 metros. Sería necesario aumentar la potencia del láser para escanear más lejos, lo que lo haría peligroso para los humanos. Además, si se utilizan longitudes de onda más largas, la precisión del escaneo disminuiría, así como el ruido de los datos (Shan & Toth, 2018).

El **TLS FARO Focus3D X130** es, por tanto, un dispositivo orientado para ser utilizado en la obtención de datos geospaciales con precisión en procesos de ingeniería, arquitectura y geotecnia que requieren mediciones detalladas y seguras en rangos de distancia moderada.

Los escáneres láser terrestres (TLS) discutidos anteriormente también son altamente efectivos para encuestas de puntos para este propósito, beneficiándose de avances tecnológicos que permiten capturar datos con aparatos de mucha precisión y rapidez. Para esto, se utilizó el escáner FARO Focus3D X130, y sus especificaciones son las siguientes:

- Capacidad para capturar 976,000 puntos de medición por segundo.
- Diseño ultraligero que facilita el transporte y minimiza la necesidad de equipos adicionales.
- Dimensiones compactas de 24 x 20 x 10 cm y un peso de 5.2 kg.
- Escaneo en tres dimensiones con una cámara a color incorporada y superposición automática de colores sin paralelismo, consiguiendo una representación fotográfica verdadera.
- Alcance de hasta 130 metros.
- Incluye sensores de nivel, GPS, brújula, conexión inalámbrica (WLAN) y pantalla táctil.
- Margen de error de  $\pm 2$  mm.

Este equipo permite realizar levantamientos de alta calidad, integrando precisión y facilidad de uso para aplicaciones geospaciales complejas.

Figura 4-1. Levantamiento en la zona de interés mediante escáner FARO Focus3D X130



Fuente: La Autora

#### 4.1.1.1. Levantamiento de nubes de puntos

Para este estudio, Se recolectaron datos en dos encuestas de nube de puntos en rondas diferentes utilizando un dispositivo **FARO Focus 3D X130** en fechas diferentes para este estudio. Así, cada encuesta se adaptó según las condiciones ambientales y las características necesarias en el momento del escaneo. La resolución regula la densidad de puntos durante el escaneo, ofreciendo alternativas que oscilan entre 1/1 y 1/32. La calidad del escaneo facilita la disminución del ruido en la información, aunque incrementa el tiempo de escaneo, lo que puede afectar la eficiencia del proceso (FARO Technologies, 2019).

Se tomaron múltiples escaneos desde diferentes posiciones alrededor del área de análisis y posteriormente se registraron y combinaron en un solo modelo de nube de puntos tridimensional. Este procedimiento de registro necesita al menos tres metas de referencia para sincronizar correctamente los escaneos individuales. Los productores de escáner, como FARO, aconsejan la utilización de tableros cuadrículados y esferas de diámetro de 145 y 300 mm. Para conseguir un desempeño óptimo, los objetivos no deben estar en línea recta, deben situarse a distintas alturas y mantener una separación mínima de 1 metro entre ellos, así como distintas distancias respecto al escáner (Girardeau-Montaut, 2017).

Dependiendo de la resolución de escaneo, se debe ajustar la ubicación máxima de los objetivos. Por ejemplo, al escanear con una resolución de 1/4 y utilizar esferas de 145

mm, la distancia máxima al escáner puede extenderse hasta 20 metros. Para distancias mayores, se utilizaron esferas de 300 mm, y en el caso de los tableros cuadrículados en formato A0, la distancia máxima al escáner cuando se utiliza una resolución de 1/4 no debe exceder los 15 metros. Estas disposiciones facilitaron la creación de una nube de puntos exacta y minuciosa, apropiada para el estudio geomorfológico y estructural del área de análisis.

Figura 4-2. Objetivos de referencia durante el monitoreo



Fuente: La Autora

#### 4.1.1.1.1. Primer levantamiento

El día 10 de mayo del 2023 se llevó a cabo el primer levantamiento de datos mediante 11 escaneos LiDAR, un paso fundamental para la caracterización precisa del área de estudio porque los datos LiDAR con máxima resolución y calidad de procesamiento garantiza una representación detallada del terreno y las estructuras presentes. Todos los escaneos se completaron en máxima resolución (1/1) y considerando la calidad del procesamiento (4x), proporcionando buena densidad de puntos y definición en los resultados. Esto permitió capturar las características críticas del terreno y las edificaciones actuales necesarias para los análisis posteriores.

En la Figura 4-3 muestra los escaneos realizados en el área de estudio. Estos se distribuyeron estratégicamente según la planificación previa basada en el análisis topográfico y las necesidades del proyecto. Sin embargo, se realizaron múltiples cambios en las ubicaciones durante la realización de la encuesta debido a factores imprevistos como la densidad de la vegetación en algunas áreas y la disponibilidad de esferas de referencia necesarias para el registro y alineación de datos. Estas modificaciones garantizaron la consistencia y calidad de los resultados, asegurando una cobertura

suficientemente amplia del área y mitigando posibles zonas de sombra o pérdida de información en el gradiente final.

La combinación de una planificación meticulosa y la flexibilidad para adaptarse a las condiciones del entorno asegura la fiabilidad de los datos adquiridos.

Figura 4-3. Ubicación de los escaneos con TLS en el primer levantamiento



Fuente: La Autora

Figura 4-4. Primer levantamiento en campo



Fuente: La Autora

#### 4.1.1.1.2. Segundo levantamiento

La segunda recopilación de datos el 19 de junio de 2023 se realizó a través de un total de 10 escaneos que nos permitieron avanzar en el desarrollo del proyecto y complementar la extracción de datos obtenida en la primera recopilación de datos. Para lograr una alta densidad de puntos necesaria para que se capturen detalles importantes para el análisis del área de estudio, se ejecutó a la mejor resolución disponible (1/1) y calidad de procesamiento de imagen (4x).

En la figura 4-5 se puede ver la distribución de los escaneos realizados en este día, donde la ubicación se definió con base en un análisis previo que tomó en consideración la topografía y los objetivos de la recopilación de datos. Sin embargo, al igual que en el caso de la primera colección de puntos de datos, fue necesario refinar los puntos adyacentes previamente definidos para adaptarse a la realidad del entorno.

La segunda recopilación de datos permite la continuidad del trabajo y precisión, proporcionando información complementaria para realizar comparaciones de nubes de puntos que se incorporarán en los análisis finales.

Figura 4-5. Ubicación de los escaneos con TLS en el segundo levantamiento



Fuente: La Autora

Figura 4-6. Segundo levantamiento en campo



Fuente: La Autora

#### **4.1.1.2. Herramientas informáticas aplicadas para el procesamiento de datos laser**

**SCENE** es un software diseñado para procesar y gestionar datos de nubes de puntos 3D (incluidos los escáneres láser FARO), pero también es capaz de ser utilizado con dispositivos de otros fabricantes. **SCENE** te ayuda a registrar, alinear y procesar escaneos tridimensionales con una interfaz fácil de usar que incluye herramientas para el reconocimiento automático de objetos y colocación precisa. Es en esta plataforma que se gestionan los escaneos 3D en paralelo con el registro para que los datos puedan ser verificados en tiempo real.

El escáner láser incluye el software **SCENE**, diseñado para facilitar la unión interactiva de escaneos. Este programa permite registrar los escaneos de manera eficiente, empleando al menos tres objetivos de referencia, como esferas o cartulinas. Por ejemplo, **SCENE** proporciona funciones avanzadas como Registro Interactivo y Registro Híbrido, un enfoque nube-a-nube combinado con el uso de objetivos para agilizar el proceso de registro.

Es importante considerar que SCENE usa muchos recursos de hardware (especialmente con proyectos con más de 2-3 escaneos grandes). En general, FARO recomienda que SCENE se ejecute en sistemas con especificaciones de alta gama (procesadores Intel Core i7 o Xeon CPUs, 64 GB RAM y almacenamiento SSD rápido) para gestionar el procesamiento de grandes cantidades de datos de escaneo de manera eficiente. Esta característica incorporada en SCENE lo desarrolló en una aplicación indispensable dentro de los campos de gestión de datos de escaneo láser (FARO Technologies, 2019).

En experiencias previas, al intentar procesar grandes conjuntos de datos con SCENE en sistemas con recursos limitados, se ha observado un uso intensivo de la memoria RAM, lo que puede afectar la eficiencia del proceso. Por lo tanto, el hardware recomendado es crucial para aprovechar las funciones del software para fusionar perfectamente los escaneos, con una precisión milimétrica.

#### **4.1.1.2.1. Registro de escaneos**

El software SCENE 2024.1 proporciona herramientas avanzadas para el registro eficiente y preciso de escaneos láser. Aquí tienes un procedimiento paso a paso para registrar las colecciones para esta versión:

- a) **Iniciar un nuevo proyecto:** Ejecutar SCENE y seleccionar "Nuevo Proyecto" para organizar los datos de escaneo de manera estructurada.
- b) **Importación de archivos:** Arrastrar y soltar los archivos con extensión ".fls" desde la memoria SD del escáner a la interfaz de SCENE.
- c) **Carga de datos:** Seleccionar los archivos importados y usar la opción "Cargar" para que SCENE lea los datos.
- d) **Tratamiento de color:** Decidir si se desea aplicar color a los escaneos o trabajar en escala de grises, según la visibilidad de los objetivos. Para ello, seleccionar la opción "Operación - Color/Imágenes" para ajustar esta configuración.
- e) **Visualización y limpieza preliminar:** Acceder a la "Vista 3D" para inspeccionar los escaneos individualmente. Usando la herramienta "Selector de polígonos" para eliminar puntos de ruido o elementos fuera de la zona a analizar.
- f) **Registro interactivo:** presenta la función de Registro Interactivo; una interfaz gráfica novedosa e intuitiva que muestra visualmente cómo los escaneos están

conectados en el proceso de registro. Elige "Crear Vista de Correspondencia" y arrastra dos escaneos secuenciales a una vista dividida en dos pantallas. Etiqueta y crea identificadores para objetivos comunes, como esferas o tableros cuadrículados.

- g) **Ajuste de correspondencias:** Emplear "Vista de correspondencia" para buscar, eliminar o forzar correspondencias entre los escaneos mostrados. Continuar este proceso hasta lograr un registro con el mínimo error posible.
- h) **Registro híbrido:** SCENE 2024.1 es capaz de realizar Registro Híbrido, usando una mezcla de enfoques basados en objetivos y de nube a nube. Esto significa que ya no tienes que elegir entre un método u otro, haciéndolo más flexible y permitiendo una mayor precisión.
- i) **Finalización del registro:** Una vez satisfecho con las correspondencias, seleccionar "Operaciones - Registro - Colocar escaneos". Seleccionar el modo de colocación "Basado en objetivos" o "Nube a nube", según corresponda.
- j) **Limpieza final:** Una revisión final para limpiar puntos no deseados para que la nube de puntos final sea lo mejor posible.
- k) **Creación de la nube de puntos del proyecto:** Construir la nube de puntos fusionada, para que pueda ser visualizada y cargada más rápido en la próxima sesión. Por favor, ten en cuenta que después de este punto, el proyecto ya no es editable en SCENE.
- l) **Exportación de la nube de puntos:** Exportar la nube de puntos en el formato requerido; en este caso, ".e57". Ya sea exportar los escaneos como archivos separados manteniendo sus ubicaciones relativas para facilitar el manejo posterior.

Registrar de esta manera, utilizando las nuevas características ofrecidas por SCENE 2024.1, les permite procesar datos de escaneo de la manera más eficiente y precisa mientras se mantiene la calidad requerida para la evaluación del proyecto.

#### **4.1.1.3. Tratamiento de nubes de puntos**

**CloudCompare** es un software libre y de código abierto para editar y renderizar nubes de puntos 3D. Este software tiene varias características que ayudan en la edición y

visualización de modelos 3D, donde los usuarios pueden ajustar finamente las nubes de puntos y usar filtros para eliminar ruido y mejorar la integridad de los datos.

CloudCompare fue indispensable para procesar y analizar datos de escaneo, con tareas operativas que incluyen:

- La eliminación de ruido y artefactos de los escaneos para asegurar que el modelo sea lo mejor posible.
- Eliminación de objetos no deseados (vehículos, personas, vegetación) de las nubes de puntos.
- Producción de ortofotos y elaboración del perfil del plano.
- Comparación de modelos y exactitud de medición de distancias para diferentes etapas del proyecto.
- Análisis detallado de áreas específicas del terreno.

CloudCompare se convirtió en una herramienta esencial integrada en el flujo de trabajo con estas funciones y permitió un análisis detallado, registro y comparación de los datos de escaneo (Girardeau-Montaut, 2017).

#### **4.1.1.3.1. Reducción de la densidad en la nube de puntos**

La reducción de la densidad de puntos en una nube de puntos es un paso importante para facilitar el manejo de grandes volúmenes de datos y optimizar los tiempos de procesamiento. CloudCompare proporciona herramientas dedicadas que preservan la geometría y apariencia generales de la escena, al mismo tiempo que realizan esta tarea de manera eficiente. Aquí están los pasos a seguir para la reducción de densidad:

- a) **Importar la nube de puntos:** Cargar la nube de puntos en CloudCompare desde el archivo de escaneo correspondiente. Asegurarse de que todos los escaneos estén correctamente cargados en el programa y sean visibles en la vista 3D.
- b) **Visualización de la nube de puntos:** Verificar la nube de puntos en la vista 3D para considerar áreas con alta densidad de puntos, que pueden ser difíciles de manejar debido al gran volumen de datos.
- c) **Seleccionar la herramienta de reducción de densidad:** CloudCompare ofrece una herramienta llamada “Subsample a pointcloud” (Submuestrear una nube de puntos), que permite reducir la cantidad de puntos en la nube. Para emplear esta

herramienta, se debe seleccionar la nube de puntos, y en el menú de herramientas, buscar la opción correspondiente.

- d) **Configuración de parámetros de reducción:** Una vez activada la herramienta, se deben configurar los parámetros de reducción. El principal parámetro es el radio de submuestreo, que define la distancia entre puntos consecutivos. El usuario puede especificar este valor (por ejemplo, 0.01 m) dependiendo de la densidad de la nube de puntos y el nivel de detalle que se desee mantener. Un radio más grande resultará en una mayor reducción de puntos, mientras que un radio más pequeño mantendrá más detalles.
- e) **Aplicar la reducción:** Tras configurar los parámetros, hacer clic en el botón para ejecutar la reducción de densidad. CloudCompare procesará la nube de puntos y eliminará los puntos de manera que se mantenga la distribución general de la superficie, pero con menos puntos. Este proceso es rápido y eficiente, pero depende de la cantidad de datos a reducir.
- f) **Revisar los resultados:** Una vez aplicada la reducción de densidad, es importante revisar la nube de puntos resultante en la vista 3D. Asegurando que la reducción no haya afectado demasiado las características clave del escaneo, como los bordes y detalles importantes.
- g) **Guardar los cambios:** Finalmente, se guarda la nube de puntos reducida en el formato requerido (por ejemplo, .e57, .las, etc.). Es recomendable exportar una versión de la nube con la densidad reducida para su uso en análisis posteriores, asegurando que el archivo sea más manejable y ligero.

La reducción de puntos en las nubes LiDAR (Tabla 4-1) de los levantamientos realizados en el sector Reina del Cisne es un proceso fundamental para optimizar la cantidad de datos sin perder la precisión geoespacial necesaria para el análisis posterior. En el primer levantamiento, la densidad inicial de puntos era de 372,691,033, pero tras un ajuste a una resolución de 0.01 m, la cantidad de puntos se redujo a 326,201,379, lo que representa una disminución del 12.5%. Este ajuste busca mantener los puntos más relevantes y representativos del terreno, eliminando datos redundantes o con menor precisión (Brunsdon et al., 2019), lo que facilita el manejo y análisis de grandes volúmenes de datos.

El segundo levantamiento sigue una tendencia similar: de 285,804,504 puntos, se ajustaron a 235,178,040 puntos con la misma resolución de 0.01 m, con una reducción del 17.7%. Al finalizar el proceso de reducción, se optimizan los recursos computacionales sin sacrificar la calidad de los análisis necesarios (Hodgson et al., 2005). Estos procesos son importantes para mantener la usabilidad de las nubes de puntos para el análisis geoespacial sin perder efectividad.

Tabla 4-1. Cantidad de puntos en densidad original y luego de reducción

	Primer Levantamiento	Segundo Levantamiento
Puntos con densidad original	372'691 033	285'804 504
Puntos ajustados a 0.01m	46'489 654	50'617 464
Puntos luego de reducción	326'201 379	235'178 040

Fuente: La Autora

#### 4.1.1.3.2. Eliminación de ruido

Eliminar el ruido de las nubes de puntos es un paso crucial para mejorar la calidad de los datos para el análisis. CloudCompare incluye diversas herramientas para detectar y filtrar puntos de ruido que no son consistentes con la estructura real del objeto escaneado. Para llevar a cabo este proceso, los pasos son:

- a) **Cargar la nube de puntos:** Importar el archivo de la nube de puntos en CloudCompare. Asegurando que todos los escaneos estén correctamente cargados y sean visibles.
- b) **Visualización de la nube de puntos:** Utilizar la vista 3D para examinar la nube de puntos y detectar áreas con ruido. Esto puede incluir puntos aislados o grupos de puntos que no corresponden a superficies reales o de interés.
- c) **Herramienta de selección de polígonos de puntos:** Activar la herramienta de selección de puntos mediante el ícono del "Selector de polígonos" en la barra de herramientas. Esta herramienta permite seleccionar de manera manual los puntos que se consideran ruido o aquellos que no pertenecen al área de interés.
- d) **Aplicar filtros de eliminación de ruido:** Para eliminar de forma automática el ruido, CloudCompare ofrece filtros como "Statistical Outlier Removal". Este filtro identifica los puntos que están dispersos y los elimina. El usuario puede

ajustar parámetros como el número de vecinos y el umbral de distancia para afinar la detección del ruido.

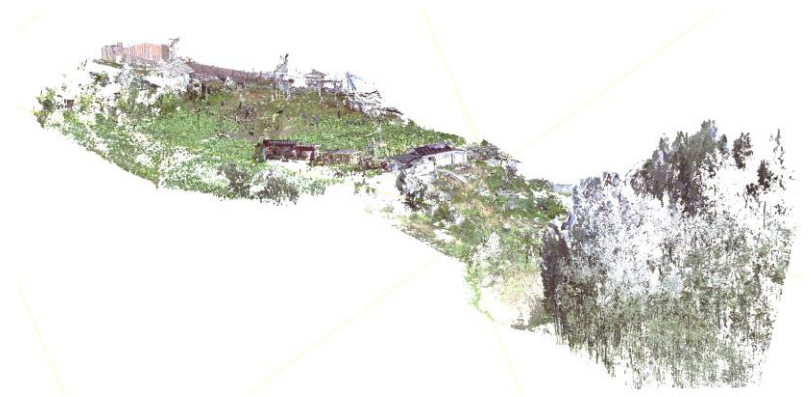
- e) **Eliminar los puntos seleccionados:** Una vez que se han identificado y seleccionado los puntos no deseados, se pueden eliminar directamente. Si se utilizó el filtro de eliminación de outliers, el software aplicará los ajustes automáticamente y reducirá los puntos de ruido de acuerdo con los criterios definidos.
- f) **Revisar la nube de puntos:** Después de eliminar el ruido, es recomendable revisar la nube de puntos para asegurarse de que la eliminación no haya afectado áreas importantes de la estructura. Se puede hacer visualmente o mediante herramientas de análisis más detallado.
- g) **Guardar los cambios:** Una vez que el ruido ha sido eliminado y la nube de puntos está limpia, se deben guardar los cambios realizados. Es recomendable exportar la nube de puntos en el formato deseado (por ejemplo, .e57 o .las) para su posterior uso.

La eliminación de ruido en CloudCompare mejora la precisión de los análisis posteriores y permite trabajar con datos más limpios y representativos de la realidad.

Figura 4-7. Proceso de eliminación de ruido en nube de puntos



Estado inicial del modelo con presencia de ruido



Estado final del modelo tras la remoción del ruido



Puntos de ruido eliminados del modelo

Fuente: La Autora

#### 4.1.1.3.3. Alineación de nubes de puntos

El proceso de alineación de dos nubes de puntos en CloudCompare utilizando puntos externos del polígono del deslizamiento se puede realizar siguiendo estos pasos:

- a) **Cargar las Nubes de Puntos:** Primero, abrir CloudCompare y cargar las dos nubes de puntos que se desean alinear. Estas nubes pueden ser de diferentes levantamientos o de distintas fases de un mismo levantamiento.
- b) **Seleccionar los Puntos de Referencia:** Seleccionar puntos clave externos que representen el polígono del deslizamiento. Estos puntos deben ser representativos y fácilmente identificables en ambas nubes de puntos. En general, estos puntos deberían corresponder a las mismas ubicaciones en ambas nubes, ubicadas en las zonas del contorno del deslizamiento.
- c) **Establecer Correspondencias:** Con la herramienta de selección, marcar los puntos de referencia en ambas nubes de puntos. Asegurándose de elegir al menos tres puntos en común que estén distribuidos de manera equidistante para obtener una alineación precisa. Utilizar la opción "Pick Point" en CloudCompare para seleccionar puntos en las dos nubes de puntos.
- d) **Alineación Inicial:** En el menú de herramientas de CloudCompare, seleccionar la opción "Align (ICP)" para realizar una alineación inicial usando los puntos seleccionados. ICP (Iterative Closest Point) ajustará las dos nubes de puntos de manera que coincidan lo mejor posible, minimizando las diferencias entre las nubes de puntos y alineando los puntos seleccionados.
- e) **Ajuste Manual de Alineación:** Si es necesario, ajustar manualmente la alineación empleando la opción de mover las nubes. Esta opción permitirá rotar, trasladar o escalar una nube de puntos para mejorar la precisión de la alineación.
- f) **Ejecutar el Algoritmo ICP:** Con puntos de referencia seleccionados y una alineación inicial opcional, ejecuta el algoritmo ICP. Esto calculará las transformaciones requeridas (traslación, rotación y escalado) para coregistrar las nubes de puntos basadas en los puntos de referencia seleccionados. Este proceso se repetirá hasta que CloudCompare alinee perfectamente el escaneo.
- g) **Verificación Visual:** Después de la alineación, se necesita verificar visualmente el resultado para asegurar que las nubes de puntos estén correctamente alineadas.

Utilizar la vista en 3D para observar cómo se superponen las nubes y revisar si las estructuras coinciden.

- h) **Guardar el Resultado:** Una vez confirmada la alineación, se guarda el proyecto o se exporta las nubes de puntos alineadas en el formato deseado (por ejemplo, .e57 o .las) para su posterior análisis o procesamiento.

Este proceso es útil cuando se necesita integrar diferentes fuentes de datos o cuando las nubes de puntos provienen de distintas fases de un levantamiento geoespacial. El uso de puntos de referencia externos del polígono del deslizamiento ayuda a asegurar una alineación precisa y confiable entre las nubes de puntos.

Figura 4-8. Distribución puntos de alineación



Fuente: La Autora

#### 4.1.1.3.4. Extracción de secciones y perfiles

El proceso de extracción de secciones o perfiles de una nube de puntos en CloudCompare se realiza con el siguiente proceso:

- a) **Abrir la Nube de Puntos:** Iniciar CloudCompare y abrir la nube de puntos de la cual se desea extraer las secciones o perfiles. Se puede hacer seleccionando la

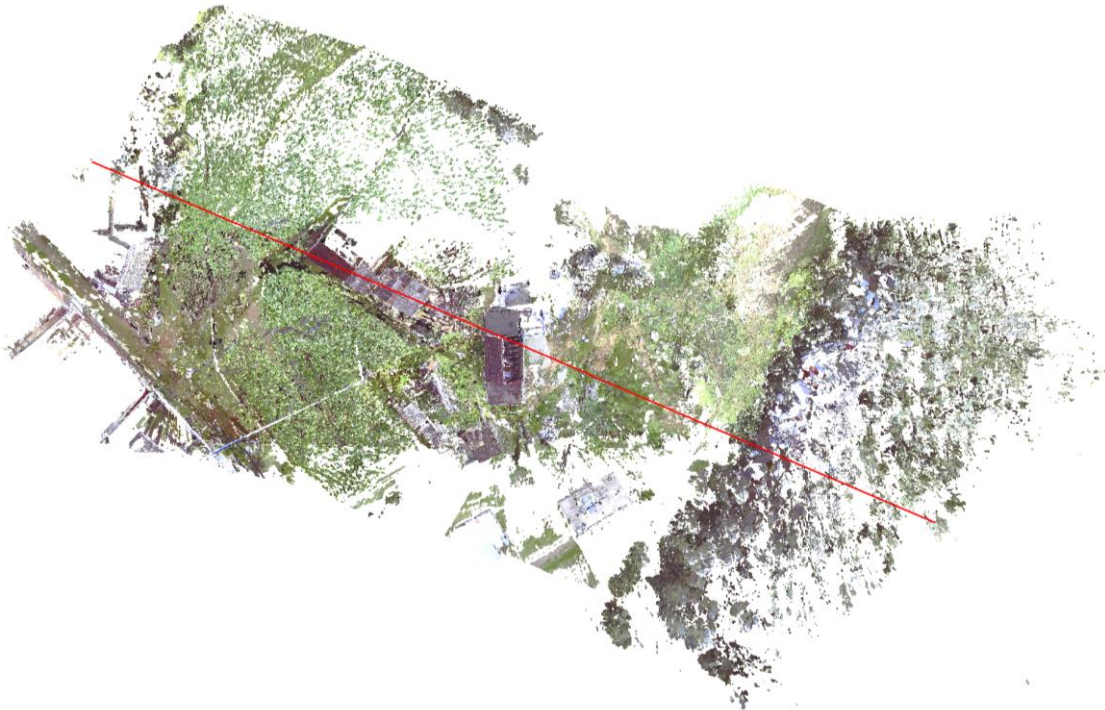
- opción "Abrir" en el menú principal y cargando el archivo correspondiente (por ejemplo, en formato .e57, .las, etc.).
- b) **Seleccionar la Herramienta de Sección:** En el menú principal, seleccionar la herramienta "Segmentación" (o "Cross-section") para comenzar a extraer la sección transversal de la nube de puntos. Esta herramienta permitirá crear un corte a lo largo de un eje específico.
  - c) **Definir el Plano de Corte:** Utilizar la opción de "Plano de corte" para definir el lugar donde deseas realizar el corte. Se dibuja el plano de manera interactiva en la ventana de visualización 3D o ingresando valores numéricos específicos para definir la orientación y posición del plano. Verificando de elegir el plano adecuado que pase por la zona de interés del modelo.
  - d) **Ajustar los Parámetros de Corte:** Si es necesario, ajustar los parámetros del plano de corte, como la distancia entre cortes o la resolución de la sección, para obtener el nivel de detalle deseado. Mover el plano a lo largo de la nube de puntos para extraer secciones en diferentes ubicaciones.
  - e) **Crear la Sección:** Una vez definido el plano de corte, seleccionar la opción para "Generar sección". CloudCompare creará una nueva entidad de perfil, que representa una sección transversal de la nube de puntos a lo largo del plano seleccionado. La sección extraída será visualizada como un conjunto de puntos a lo largo de la dirección del corte.
  - f) **Visualizar la Sección o Perfil:** Después de generar la sección, se podrá visualizar en la ventana de visualización 3D de CloudCompare. Luego, se podrá hacer zoom, rotar y mover la vista para inspeccionar la sección extraída en detalle.
  - g) **Exportar la Sección:** Si se necesita guardar la sección para su posterior análisis o uso en otros programas, seleccionar la opción "Guardar como" en el menú principal. Elegir el formato de archivo adecuado (por ejemplo, .las, .e57, etc.) para exportar la sección extraída. De esta manera, se obtendrá un archivo con los puntos de la sección que podrás utilizar en otras herramientas o análisis.
  - h) **Repetir el Proceso:** Si se necesita generar más secciones en otras ubicaciones o con diferentes planos de corte, repetir el proceso ajustando el plano de corte y los

parámetros según sea necesario. Generar múltiples secciones a lo largo de la nube de puntos para analizar diferentes áreas del modelo.

- i) **Guardar el Proyecto:** Para guardar todos los cambios realizados en el proyecto, seleccionar "Guardar proyecto" en el menú. Esto asegurará que tanto la nube de puntos original como las secciones extraídas se guarden en el formato del proyecto de CloudCompare.

Este procedimiento permite extraer secciones precisas de una nube de puntos en CloudCompare, facilitando el análisis detallado de diferentes áreas de un modelo 3D y su posterior procesamiento o visualización.

Figura 4-9. Alineación para la extracción de perfil



Fuente: La Autora

#### 4.1.1.4. Generación de perfiles

**AutoCAD Civil 3D 2023**, es la versión más nueva de un software innovador lanzado por Autodesk para el diseño 3D y la documentación de proyectos de infraestructura como carreteras, redes de servicios públicos, movimientos de tierra y planificación urbana. Civil 3D incluye herramientas dedicadas que están diseñadas para mejorar el flujo de trabajo en ingeniería civil, como modelado de terreno, análisis de

superficies y creación de perfiles. Una de las funcionalidades destacadas es la herramienta de “**Point Cloud**”, que examina nubes de puntos que provienen de tecnología como escáneres láser terrestres, generando un modelo tridimensional fotorrealista de alta precisión. Esto se llama Generar modelos de superficie y comparar encuestas para identificar cambios en el terreno. En este proyecto, el número grande de puntos procesados se redujo para la necesidad de optimizar tanto el software como la operación de equipos, con la mayor densidad de puntos, así como permitir una mejor y más fluida visualización y manipulación en el software sin pérdida de precisión en detalles clave (Krishnan, 2022).

#### **4.1.1.4.1. Análisis de los perfiles extraídos**

El proceso de exportación de una nube de puntos desde Civil 3D para generar un perfil o grilla para el análisis de cambios de cota se realiza mediante los siguientes pasos:

- a) **Abrir el Proyecto en Civil 3D:** Iniciar Civil 3D y cargar el proyecto de la nube de puntos que se desea exportar. Asegurarse de que la nube de puntos esté correctamente importada y visible en el espacio de trabajo.
- b) **Seleccionar la Nube de Puntos:** En el área de dibujo de Civil 3D, seleccionar la nube de puntos que se utilizará para crear el perfil o grilla.
- c) **Crear una Superficie a partir de la Nube de Puntos:** La nube de puntos necesita ser convertida a una superficie digital para llevar a cabo directamente el análisis de cambios de elevación.
  - En el menú "Prospector", hacer clic derecho en "Surfaces" (Superficies) y seleccionar "Create Surface" (Crear Superficie).
  - En la ventana de creación de superficies, elegir un tipo de superficie adecuado (por ejemplo, una superficie de "TIN" o "Grid").
  - Luego, en la pestaña "Definition" (Definición), seleccionar "Point Cloud" (Nube de Puntos) como fuente de datos.
  - Agregar la nube de puntos al modelo de superficie, lo que permitirá que Civil 3D utilice la información de la nube de puntos para generar una superficie topográfica.

d) **Ajustar la Superficie:** Si es necesario, ajustar los parámetros de la superficie para asegurar que la malla de la superficie refleje correctamente los cambios de cota. Se pueden filtrar o editar puntos de la nube de puntos para eliminar datos innecesarios o erróneos.

e) **Elaboración de Perfil:**

- En la pestaña "Home" (Inicio), seleccionar la opción "Profile" (Perfil) en el grupo de herramientas "Create Design" (Crear Diseño).
- Luego, seleccionar "Create Surface Profile" (Crear Perfil de Superficie).
- En la ventana de creación del perfil, seleccionar la superficie recién generada a partir de la nube de puntos.
- Definir la alineación del perfil, que será la línea a lo largo de la cual se extraerá la información de cota. Se puede dibujar un alineamiento utilizando la herramienta "Alignment" (Alineación), si aún no se tiene uno.
- Ajustar las opciones de visualización del perfil según sea necesario (por ejemplo, mostrar las cotas, las curvas de nivel, etc.).

f) **Exportar los Datos del Perfil:** Una vez generado el perfil, exportar los datos de cotas a un archivo para su análisis de cambios de cota.

- Para exportar el perfil, seleccionar la opción "Export" (Exportar) en el menú de perfil o en el espacio de trabajo.
- Elegir el formato de exportación adecuado, como un archivo de texto (.txt) o CSV (.csv), que contendrá las coordenadas y cotas del perfil a lo largo del alineamiento seleccionado.
- Asegurarse de seleccionar los datos relevantes para el análisis de cambios de cota (por ejemplo, las cotas a lo largo del perfil en cada estación).

g) **Generar una Grilla de Cotizaciones:** Si se necesita realizar un análisis en forma de grilla (por ejemplo, para comparar cambios de cota en áreas específicas), generar una malla o grilla de puntos:

- Ir a la pestaña "Surface" (Superficie) y seleccionar "Extract Objects" (Extraer Objetos).

- Seleccionar "Grid" (Grilla) y definir las dimensiones de la malla (por ejemplo, el espaciado entre puntos de la grilla).
  - Civil 3D generará una malla de puntos con las cotas de la superficie, que luego se puede exportar como un archivo de puntos para su análisis posterior.
- h) **Analizar los Cambios de Cota:** Una vez exportados los datos de cotas (ya sea a través del perfil o la grilla), utilizar software de análisis de datos o Excel para comparar las cotas de diferentes momentos y detectar cambios. Si se están analizando varios modelos de superficie, también se puede usar la herramienta de "Difference Surface" (Superficie de Diferencia) en Civil 3D para comparar las superficies y resaltar los cambios de cota en las áreas de interés.
- i) **Guardar el Proyecto:** Finalmente, guardar el proyecto de Civil 3D con las modificaciones y los datos exportados. Esto asegurará que se pueda acceder a la información en el futuro y continuar con el análisis de los cambios de cota cuando sea necesario.

## 4.2. Análisis físico y mecánico de los suelos

Figura 4-10. Mapa de sitios de extracción de muestras de suelo



Fuente: La Autora

### 4.2.1. Granulometría por cribado

El proceso para realizar el ensayo de granulometría por cribado para suelos finos, de acuerdo con la norma ASTM D422 - "Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils", se detalla a continuación:

#### Materiales y equipos necesarios:

1. Muestra de suelo: Representativa del material a analizar.
2. Tamices: Con mallas de diferentes tamaños según las normas ASTM, generalmente de 4.75 mm a 0.075 mm (tamiz No. 200).
3. Balanza: Con precisión de al menos 0.01 g.
4. Horno de secado: Para secar la muestra de suelo a temperatura constante.
5. Cepillo de cerdas suaves: Para limpiar los tamices.
6. Agua (en caso de que sea necesario lavar la muestra).

#### Procedimiento:

1. Preparación de la muestra:

- Tomar una muestra representativa del suelo, siguiendo el procedimiento de muestreo adecuado para asegurar que sea representativa.
- Pesar la muestra húmeda antes de comenzar el análisis.
- Si la muestra es húmeda, secarla en el horno a una temperatura constante de 105°C a 110°C hasta alcanzar peso constante. Una vez seca, se debe enfriar a temperatura ambiente.

## 2. Selección de tamices:

- Seleccionar los tamices adecuados según el rango de tamaños de partículas del suelo a analizar. Según la norma ASTM D422, los tamices más comunes son:
  - Tamiz de 4.75 mm (tamiz No. 4) para partículas gruesas.
  - Tamiz de 0.075 mm (tamiz No. 200) para partículas finas.
  - El tamaño de los tamices puede ajustarse dependiendo de los requisitos específicos del ensayo.
- Los tamices deben ser colocados en una columna de tal manera que el tamiz de mayor tamaño esté en la parte superior y el de menor tamaño en la parte inferior.

## 3. Cribado:

- Colocar la muestra de suelo seca sobre el tamiz más grande (generalmente de 4.75 mm).
- Realizar el proceso de cribado manual o mediante una máquina de cribado, si está disponible con movimientos circulares y de vaivén para asegurar que las partículas pasen a través de los tamices correspondientes.

### **4.2.2. Límites de consistencia o límites de Atterberg**

Los límites de consistencia o límites de Atterberg son utilizados para clasificar y caracterizar la plasticidad de los suelos finos. Estos límites se determinan mediante ensayos de laboratorio que permiten definir las transiciones entre los diferentes estados del suelo (líquido, plástico y sólido). De acuerdo con la norma ASTM D4318-17 - "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", se

realizan dos ensayos: el límite líquido y el límite plástico. A continuación, se describe el proceso de cada uno de estos límites de forma detallada.

#### **4.2.2.1. Determinación del Límite líquido (LL)**

**Norma:** ASTM D4318-17

##### **Materiales y Equipos:**

1. Muestra de suelo finamente triturada (tamiz No. 40).
2. Cuchara de Casagrande.
3. Calibrador.
4. Espátula.
5. Agua destilada.
6. Balanza de precisión.
7. Tamiz No. 40.
8. Contenedor para la muestra.

##### **Procedimiento:**

1. Preparación de la muestra:
  - Tamizar la muestra de suelo para eliminar las partículas gruesas y obtener una muestra de suelo fino.
  - Pesar una cantidad representativa de muestra, generalmente entre 150 y 200 gramos.
2. Mezcla de la muestra:
  - Colocar la muestra de suelo en un recipiente limpio y agregar agua destilada gradualmente.
  - Mezclar la muestra de suelo con el agua hasta obtener una pasta homogénea. Asegúrese de que la mezcla sea lo suficientemente fluida para permitir el corte, pero no tan líquida como para que no se pueda trabajar.
3. Realización de la prueba:
  - Colocar la muestra en la cuchara de Casagrande, de forma que quede un pequeño montículo que se pueda cortar con la espátula.

- Usar la espátula para cortar una porción de la muestra y aplicar el movimiento de la cuchara de Casagrande sobre una superficie plana. Se debe hacer girar la cuchara sobre la superficie y observar cómo la ranura se abre a medida que se realiza el movimiento.
- Continuar el movimiento hasta que la ranura de la muestra se cierre exactamente 12.7 mm (1/2 pulgada). Este es el punto de corte.
- Llevar al horno por 24 horas las muestras de suelo en el punto de cierre; pesar antes y después del secado.

#### 4. Medición de la cantidad de agua:

- Anotar la cantidad de agua que se añadió al suelo en cada ensayo, y realizar múltiples ensayos para encontrar el punto donde la ranura se cierra a 12.7 mm.
- Asegurarse de que al menos tres pruebas se realicen con diferentes contenidos de agua para obtener un promedio fiable.
- Trazar la gráfica (curva de fluidez) con los contenidos de agua en el eje vertical y los números de golpes en el eje horizontal. El límite líquido del suelo se obtiene a partir de la ordenada correspondiente a los 25 golpes.

#### **4.2.2.2. Determinación del Límite Plástico (LP)**

**Norma:** ASTM D4318-17

#### **Materiales y Equipos:**

1. Muestra de suelo tamizada (tamiz No. 40).
2. Placa de vidrio o superficie plana.
3. Regla de acero.
4. Espátula.
5. Agua destilada.
6. Balanza de precisión.
7. Recipiente para la muestra.

**Procedimiento:**

1. Preparación de la muestra:
  - Al igual que para el límite líquido, tamizar la muestra de suelo a través del tamiz de 425 micras (tamiz No. 40).
  - Tomar una porción de muestra de aproximadamente 20 a 50 gramos de suelo tamizado.
2. Mezcla con agua:
  - Agregar agua gradualmente a la muestra de suelo, mezclando bien hasta que la masa se vuelva plástica y moldeable. Asegúrese de que la muestra no sea ni tan seca ni tan húmeda como para que sea imposible formar una bola o cilindro.
3. Formación del hilo:
  - Colocar la muestra sobre una placa de vidrio o superficie plana limpia. Usando las manos o una espátula, forme un hilo de suelo que tenga aproximadamente 3 mm de diámetro.
4. Prueba de límite plástico:
  - Continuar enrollando el hilo de suelo hasta que se rompa, dejando que la muestra se resquebraje a medida que se enrolla.
  - Determinar el contenido de agua en la muestra cuando el hilo de suelo se quiebre a una longitud de aproximadamente 3 mm.
  - Llevar al horno por 24 horas las muestras; pesar antes y después del secado.

**4.2.3. Ensayo de Corte Directo**

El ensayo de corte directo de suelos se realiza conforme a la norma ASTM D3080-14, que establece el procedimiento para determinar la resistencia al corte de suelos saturados bajo condiciones de drenaje controlado.

**Materiales y Equipos:**

1. Muestra de suelo representativa.
2. Caja de corte con divisores para separar la muestra en dos partes.

3. Placa de carga vertical.
4. Máquina de corte directo (con un sistema para aplicar y medir la carga vertical y horizontal).
5. Balanza para pesar la muestra de suelo.

### **Procedimiento**

1. Preparación de la muestra:
  - Coloque el molde muestreador sobre la muestra compactada; generalmente, las máquinas de corte directo emplean especímenes con dimensiones de 6 cm por lado.
  - Se debe pesar la muestra para calcular su peso específico y contenido de humedad.
2. Procedimiento de la Prueba:
  - Montaje de la muestra: La muestra se coloca en una caja de corte directo, que está dividida en dos secciones horizontales. La muestra se somete a una carga vertical aplicada mediante una prensa, lo que simula las tensiones a las que estará sometida el suelo en el campo.
  - Aplicación de la carga normal: Se aplica una carga normal en la parte superior de la muestra, que se mantiene constante durante el ensayo. Esta carga representa el peso de las capas superiores del suelo o la sobrecarga. El valor de la carga normal debe ser establecido según las condiciones de campo o las especificaciones del proyecto.
  - Corte de la muestra: A continuación, se aplica una carga de corte horizontal a la mitad inferior de la muestra, mediante un sistema que permite la división controlada de la muestra. La carga se incrementa gradualmente mientras se mide el desplazamiento horizontal. Este proceso permite que el suelo se deslice a través de la línea de corte.
  - Medición del desplazamiento y la carga de corte: Se registran los valores de la carga de corte y el desplazamiento en función del tiempo durante el ensayo. La relación entre estas dos variables permite calcular la resistencia

al corte del suelo. La prueba generalmente continúa hasta que se alcanza el deslizamiento máximo o la falla completa de la muestra.

- Determinación de la resistencia al corte: Una vez que se completa el ensayo, se calcula la resistencia al corte utilizando las ecuaciones de la norma, basadas en las cargas aplicadas y las áreas de las superficies de corte. La resistencia al corte se puede expresar en términos de la fuerza máxima alcanzada o en términos de los parámetros de cohesión ( $c$ ) y ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) del suelo.

#### **4.2.4. Ensayo de Permeabilidad – carga variable**

El ensayo de permeabilidad para suelos finos mediante carga variable se ejecuta siguiendo la norma ASTM D5084, que establece el procedimiento para determinar el coeficiente de permeabilidad en suelos cohesivos utilizando un permeámetro de carga variable. Este método es particularmente útil para suelos de baja permeabilidad, en los que la medición del flujo de agua a través de la muestra se realiza midiendo la variación del nivel de agua en un tubo graduado con el tiempo.

##### **Materiales y Equipo:**

1. Permeámetro de carga variable.
2. Cilindro muestreador para extraer el espécimen de suelo.
3. Bureta graduada para medir el flujo de agua.
4. Tanque de agua para mantener una presión hidráulica constante.
5. Balanza de precisión.
6. Cronómetro para registrar el tiempo de flujo.
7. Herramientas para preparar la muestra (cortadores y compactadores).

##### **Procedimiento:**

1. Preparación de la Muestra:
  - Extraer el espécimen de suelo utilizando un cilindro muestreador o molde, evitando alterar su estructura.
  - Saturar completamente la muestra sumergiéndola en agua desionizada por un tiempo suficiente (hasta eliminar las burbujas de aire).

- Colocar la muestra en el permeámetro, asegurándose de sellar los bordes con membranas impermeables para evitar fugas.

## 2. Configuración del Permeámetro:

- Llenar el sistema con agua desionizada asegurando la eliminación de burbujas en las líneas de entrada y salida.
- Conectar la muestra al permeámetro.
- Ajustar el tubo de carga variable a una altura inicial conocida.

## 3. Ensayo de Permeabilidad:

- Registrar la altura inicial del agua en el tubo graduado.
- Permitir que el agua fluya a través de la muestra y registrar los niveles de agua en intervalos de tiempo específicos.
- Continuar las mediciones hasta que la tasa de descenso del nivel de agua se estabilice.
- Retirar la muestra del permeámetro y medir su humedad y densidad final para evaluar posibles cambios.

Figura 4-11. Ensayo de Permeabilidad



Fuente: La Autora

#### 4.2.5. Ensayos Geofísicos (MASW, ESAC Y REMI)

**MASW:** Se dispusieron 24 geófonos alineados en una trayectoria recta, con una distancia de 1.5 metros entre cada uno, abarcando un total de 36 metros de línea de ensayo. A lo largo de esta línea, se efectuaron impactos sobre una placa de acero utilizando un combo, realizando cinco golpes en cada posición específica. En total, se llevaron a cabo siete "shots" distribuidos estratégicamente para el ensayo.

**ERT:** Se dispusieron 32 electrodos alineados de forma recta, manteniendo una separación de 5 metros entre cada uno. Esta configuración abarcó una longitud total de 155 metros a lo largo de la línea destinada para el ensayo.

**ESAC:** En este ensayo, se requiere ajustar la disposición de los geófonos, trazando dos líneas que formen un ángulo perpendicular. Se desplegaron un total de 12 geófonos a una distancia de 6 metros entre sí y una longitud máxima de 60 metros; dos de ellos funcionan como receptores. Posteriormente, esta actividad fue registrada a lo largo del tiempo, obteniendo los datos necesarios.

Figura 4-12. Ejecución de ensayos geofísicos



Fuente: La Autora

Al combinar los datos de MASW, ERT y ESAC, se obtiene una visión integral del subsuelo. Cuando se proporcionan juntos, estas pruebas brindan información que se complementa entre sí en los siguientes aspectos:

- La estructura estratigráfica del suelo (ERT y MASW).

- Las propiedades mecánicas del subsuelo (MASW y ESAC).
- La resistencia sísmica y la respuesta dinámica del suelo (MASW y ESAC).
- La presencia de agua o contaminantes (ERT).

Estos análisis combinados son fundamentales para la evaluación de riesgos geotécnicos y sísmicos, el diseño de cimientos, y la planificación de obras de infraestructura en zonas con características geológicas complejas o inestables.

### **4.3. Obtención del Factor de Seguridad (F.S.) de la ladera**

El proceso para determinar el factor de seguridad de una ladera utilizando el software Rocscience - Slide 2023 involucra varios pasos que van desde la creación del modelo de la ladera hasta el análisis de estabilidad. A continuación, se describe el proceso:

#### **Preparación de datos de entrada:**

1. Topografía y geología: Recolectar datos geotécnicos como las propiedades del suelo, estratificación, y cualquier información relevante sobre la ladera (por ejemplo, tipo de suelo, cohesión, ángulo de fricción interna).
2. Modelo de la ladera: Obtener o generar un modelo topográfico de la ladera. Los datos pueden provenir de levantamientos topográficos, modelos digitales de elevación (DEM) o mapas geológicos.
3. Definición de áreas de falla: Delimitar las áreas donde se espera que se pueda producir una falla en la ladera (por ejemplo, zonas más débiles, donde el agua subterránea podría afectar la estabilidad).

#### **Creación del modelo en Slide 5:**

1. Abrir Slide 5: Iniciar el software Rocscience Slide 5.
2. Importar los datos: Cargar el modelo topográfico de la ladera, ya sea mediante la importación de archivos CAD, DXF, o directamente desde las herramientas de dibujo del software.
3. Definir estratos geológicos: Asignar los distintos materiales geotécnicos de la ladera en el software, proporcionando las propiedades geotécnicas de cada capa, como cohesión, ángulo de fricción interna y peso unitario.

4. Establecer las condiciones de la ladera: Determinar las condiciones de carga y la presencia de agua subterránea, lo que puede influir significativamente en la estabilidad de la ladera.

**Definición de la malla de deslizamiento:**

1. Tipo de malla: En Slide 5, se define una malla para las posibles superficies de deslizamiento. El software permite crear una malla de posibles superficies de falla, que puede ser circular, deslizante o de tipo complejo.
2. Selección de una superficie de deslizamiento: Dependiendo de la geometría de la ladera y la topografía, Slide 5 generará diferentes superficies de deslizamiento para analizar, o puedes optar por definir una superficie manualmente si ya tienes una idea del área más susceptible a la falla.

**Análisis del factor de seguridad:**

1. Método de análisis: Seleccionar el tipo de análisis que se desea realizar (por ejemplo, el método de Morgenstern-Price, el de Bishop Simplificado, o el de Fellenius, entre otros).
2. Simulación de condiciones de carga: Ajustar las condiciones de carga externas, como la presencia de agua o cualquier fuerza externa que pueda actuar sobre la ladera.
3. Cálculo del factor de seguridad: El software realiza el cálculo del factor de seguridad (FS), que es la relación entre la resistencia total de la ladera y la carga que puede generar la falla. Un valor de FS mayor a 1 indica estabilidad, mientras que un valor menor a 1 indica que la ladera es inestable.

## Capítulo 5: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

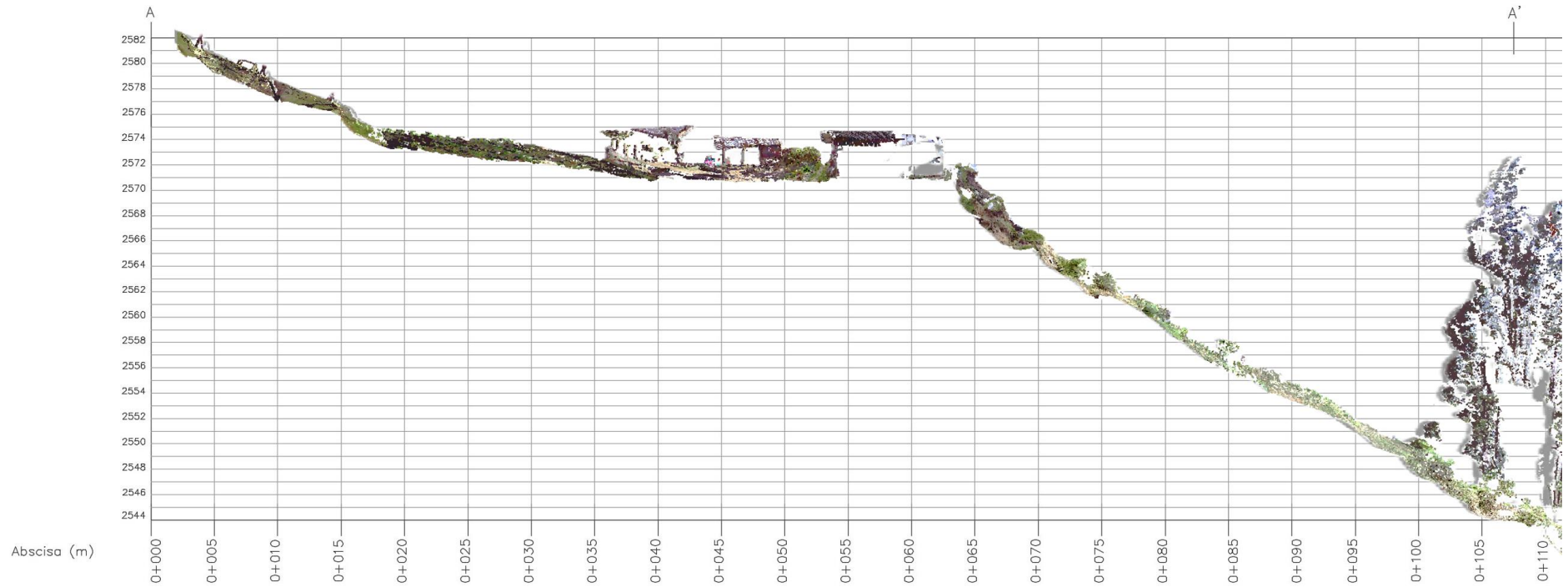
### 5.1. Evaluación de las deformaciones de terreno

En la explicación de los perfiles topográficos registrados durante el estudio de movimientos en masa, se destacan dos diferencias significativas en la deformación del terreno a través de tres características. Estos perfiles nos permiten ver cómo se comporta la pendiente y su profundidad por sección, mostrándonos cómo la infiltración de agua y los mini-deslizamientos secundarios la influyen. Los mapas muestran una disminución en la altura de la pendiente en algunos puntos, demostrando la dinámica del deslizamiento de tierras que actualmente ocurre. Sin embargo, con las comparaciones de estos perfiles, es posible ver un panorama más preciso de lo que sobre la pendiente puede influir en la estabilidad general y destacar las porciones de la pendiente que probablemente sufran desplazamientos en el futuro.

#### 5.1.1. Perfil A-A'

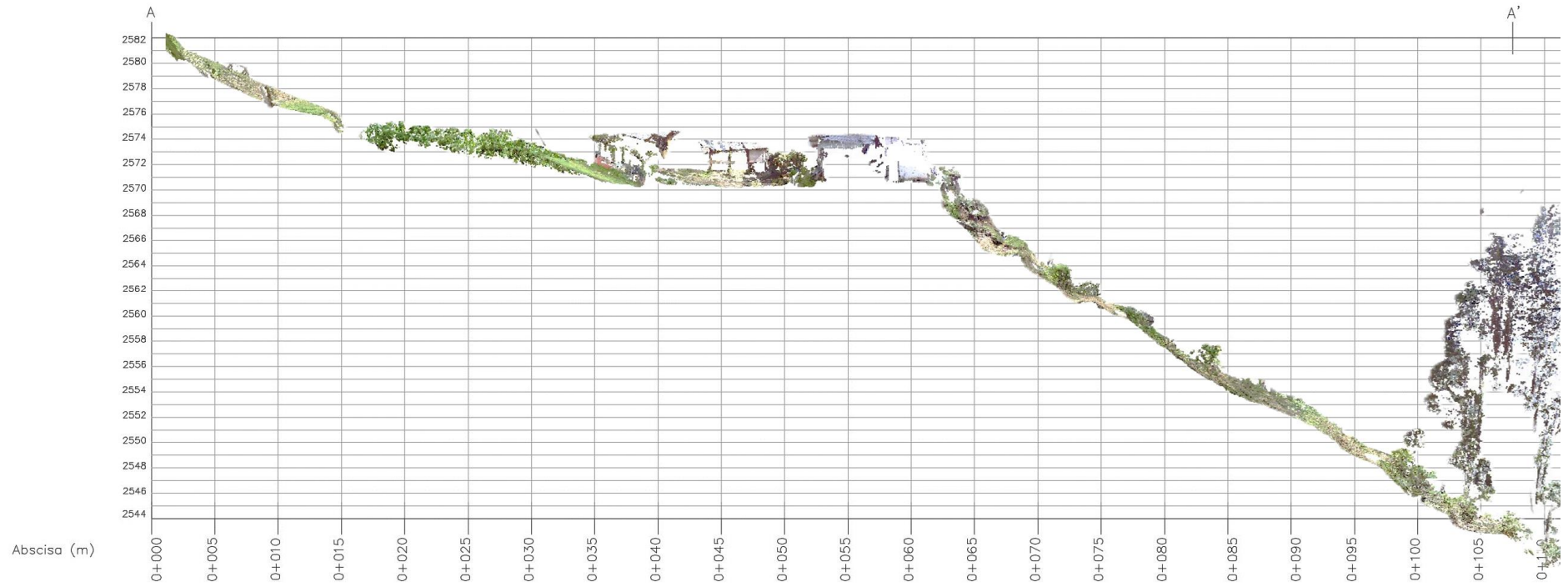
En este perfil (Figura 5-3), se observan ambos movimientos del terreno. La menor altura (50 cm) y la abscisa (0+015) indican un desplazamiento mayor (debido al escarpe principal del deslizamiento). Pero al mismo tiempo, el terreno parece ser estable desde la abscisa (0+020 a 0+035) donde el maíz vegeta, mostrándonos que algo está creciendo allí. Esto puede implicar que la inestabilidad debido al deslizamiento aún no ha introducido un impacto irreversible en toda la sección transversal del perfil, resultando en las áreas menos afectadas. Hay un deslizamiento estratificado hacia la superficie de la tierra, mientras la abscisa (0+040 a 0+105) avanza hacia fuera, con un hundimiento más claro de (material del suelo de 20 cm a 50 cm), lo que también indica deslizamiento activo. Este asentamiento puede estar vinculado a la penetración de agua en capas de suelo más cercanas y profundas, reduciendo la exposición de la resistencia del suelo y facilitando el movimiento de las capas superiores. Esto puede implicar que la pendiente entra en un estado de estabilidad parcial por fases, mientras la infiltración de agua sigue controlando el proceso de deslizamiento.

Figura 5-1. Perfil A-A' primer levantamiento (10 de mayo 2023)



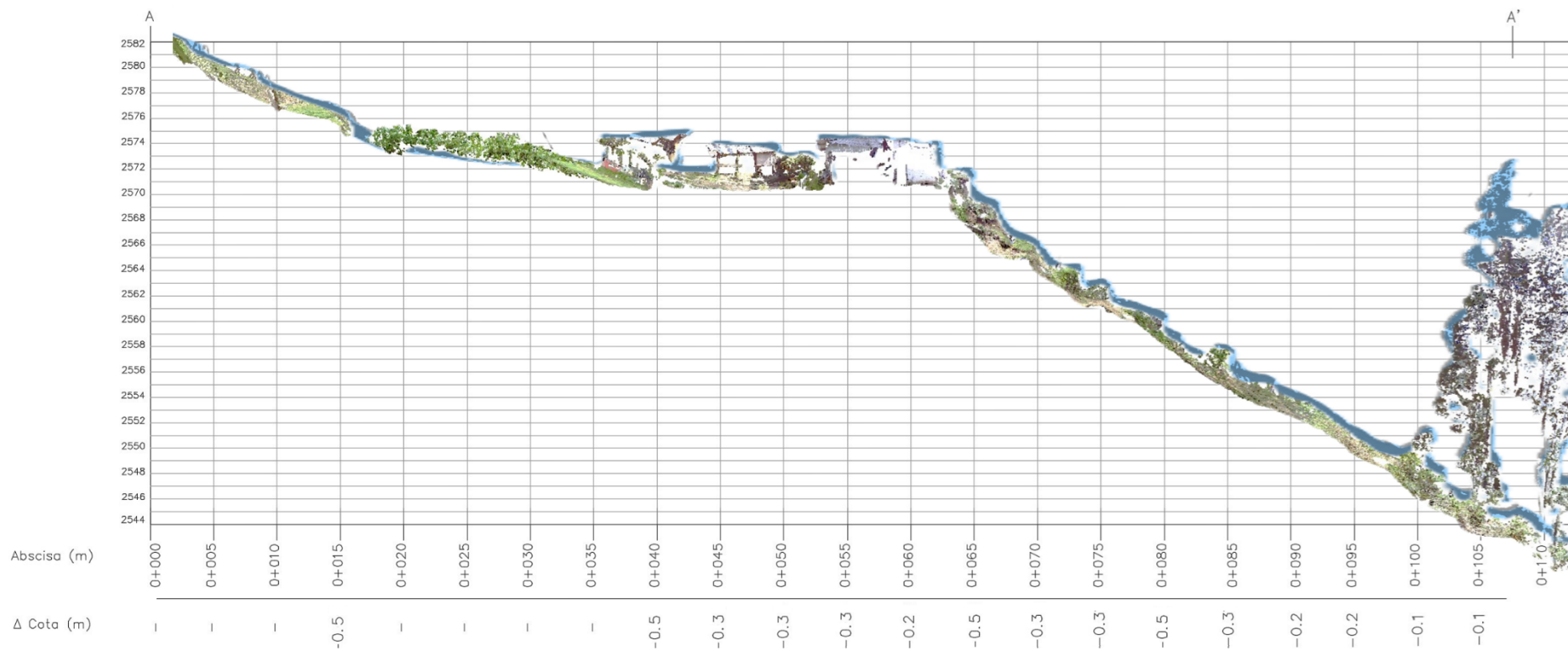
Fuente: La Autora

Figura 5-2. Perfil A-A' segundo levantamiento (19 de junio de 2023)



Fuente: La Autora

Figura 5-3. Perfil A-A', Primer levantamiento (Azul) vs. Segundo levantamiento (RGB)

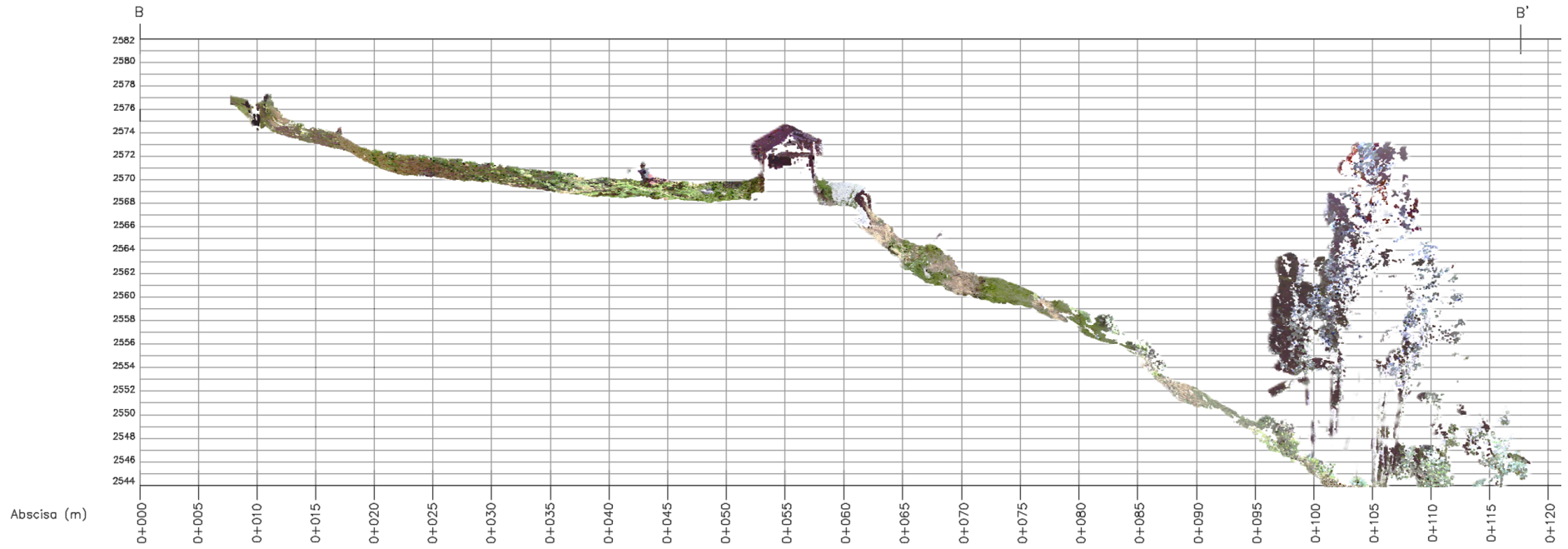


Fuente: La Autora

### **5.1.2. Perfil B-B'**

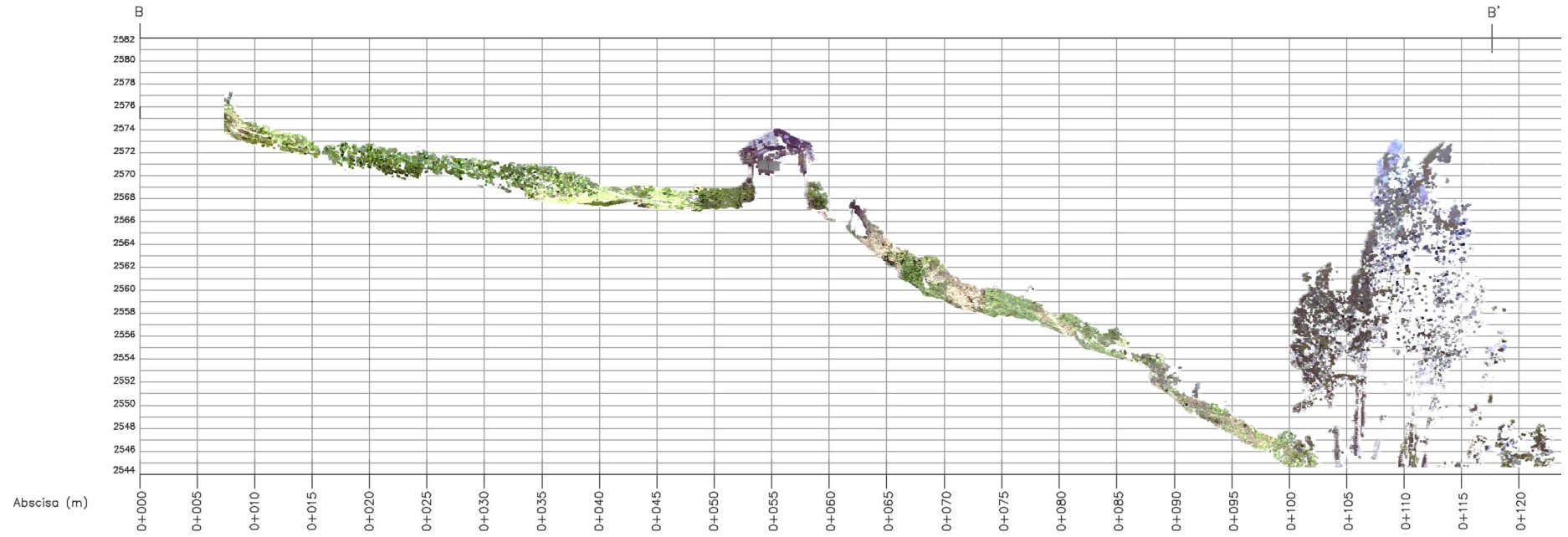
Este perfil B-B' (Figura 5-6), ubicado en el eje central del deslizamiento, muestra un movimiento muy evidente. En el centro del deslizamiento constituye la posición más afectada, donde los movimientos del terreno son también más pronunciados (de 30 cm a 50 cm). El suelo, al estar saturado por la infiltración de agua [en el área], lo ha afectado significativamente, disminuyendo la fricción entre las partículas del suelo y facilitando su deslizamiento. Un hundimiento del suelo progresivamente lento puede ser detectado en esta área, lo que respalda sustancialmente que la infiltración de agua está realmente y fuertemente contribuyendo a la desestabilización de la pendiente. Además, escarpes secundarios están desencadenando mini-deslizamientos en el perfil B-B'. Aunque estos movimientos son secundarios, inducen complejidades en el deslizamiento principal, al actuar como puntos débiles secundarios que incrementan el deslizamiento a lo largo de la pendiente. Este perfil mostró mayor susceptibilidad para desplazamientos anticipados del terreno debido a la combinación de infiltración de agua y la ocurrencia de mini-deslizamientos generados bajo condiciones muy frágiles. En ese sentido, el perfil B-B' parece estar en una etapa desarrollada de deslizamiento y, por lo tanto, es un área importante para monitorear e intervenir.

Figura 5-4. Perfil B-B' primer levantamiento (10 de mayo 2023)



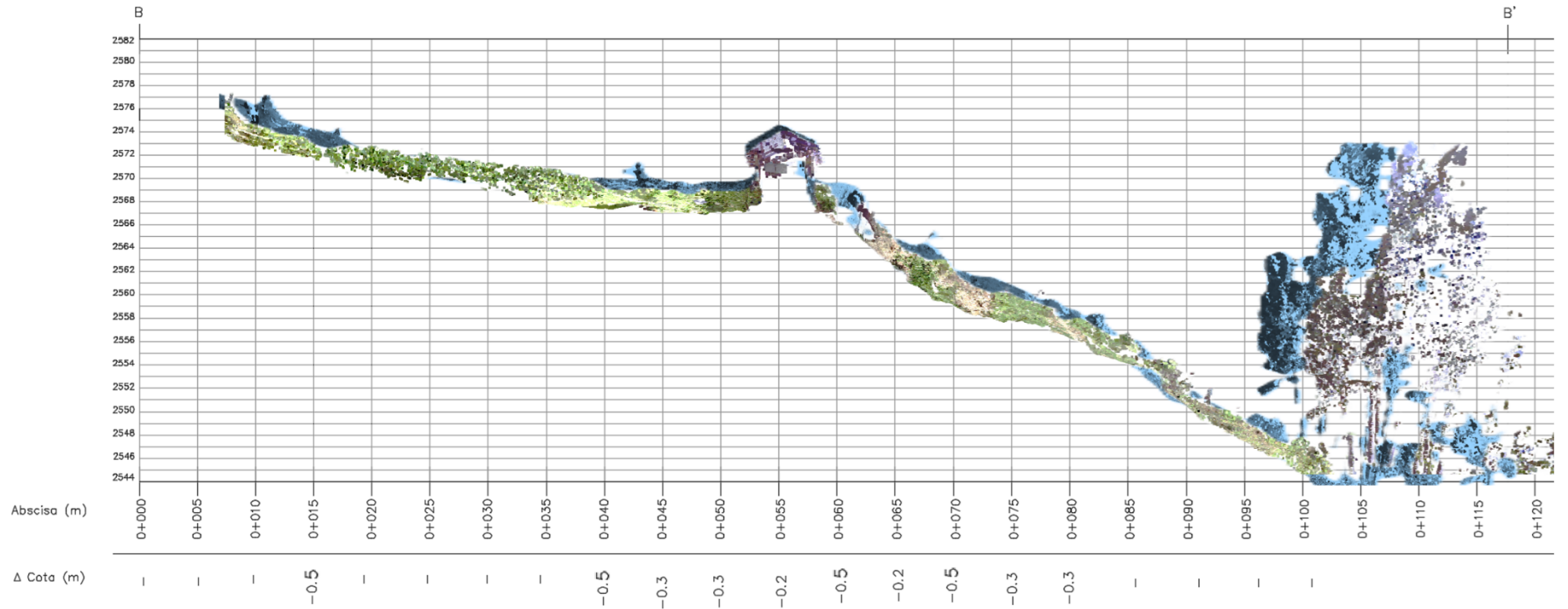
Fuente: La Autora

Figura 5-5. Perfil B-B' segundo levantamiento (19 de junio 2023)



Fuente: La Autora

Figura 5-6. Perfil B-B', Primer levantamiento (Azul) vs. Segundo levantamiento (RGB)

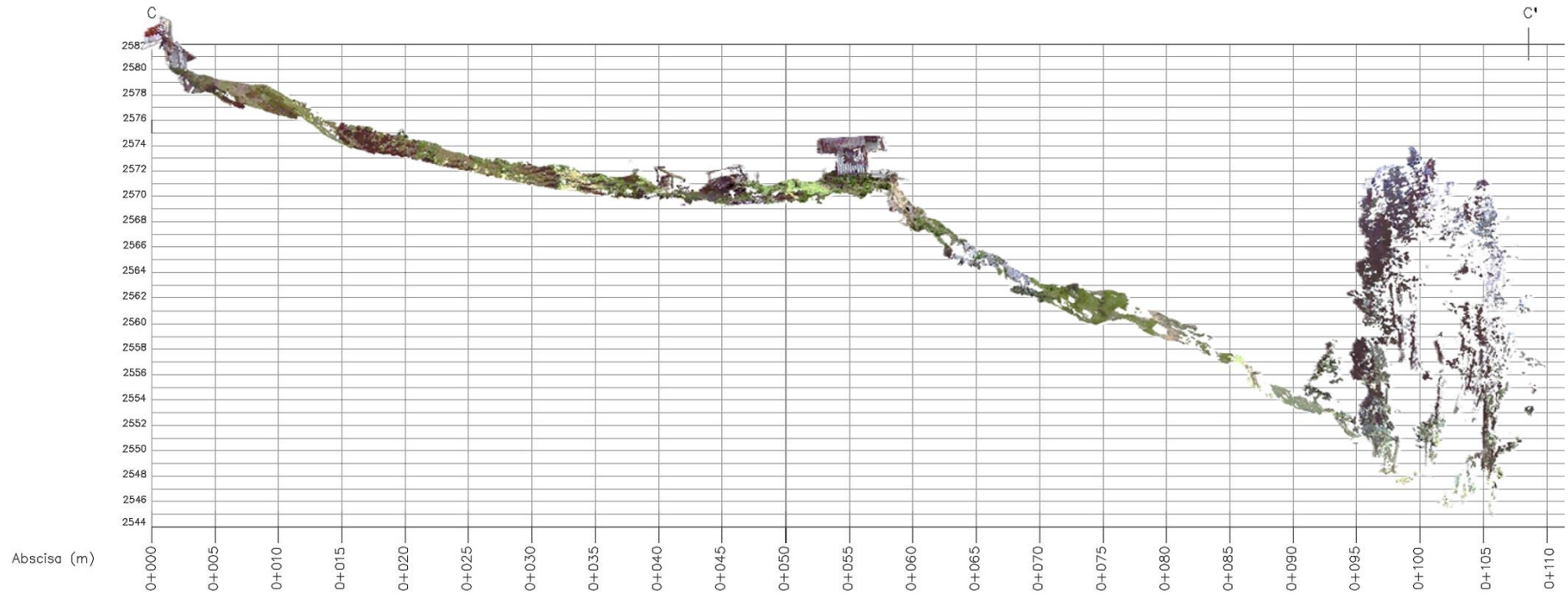


Fuente: La Autora

### 5.1.3. Perfil C-C'

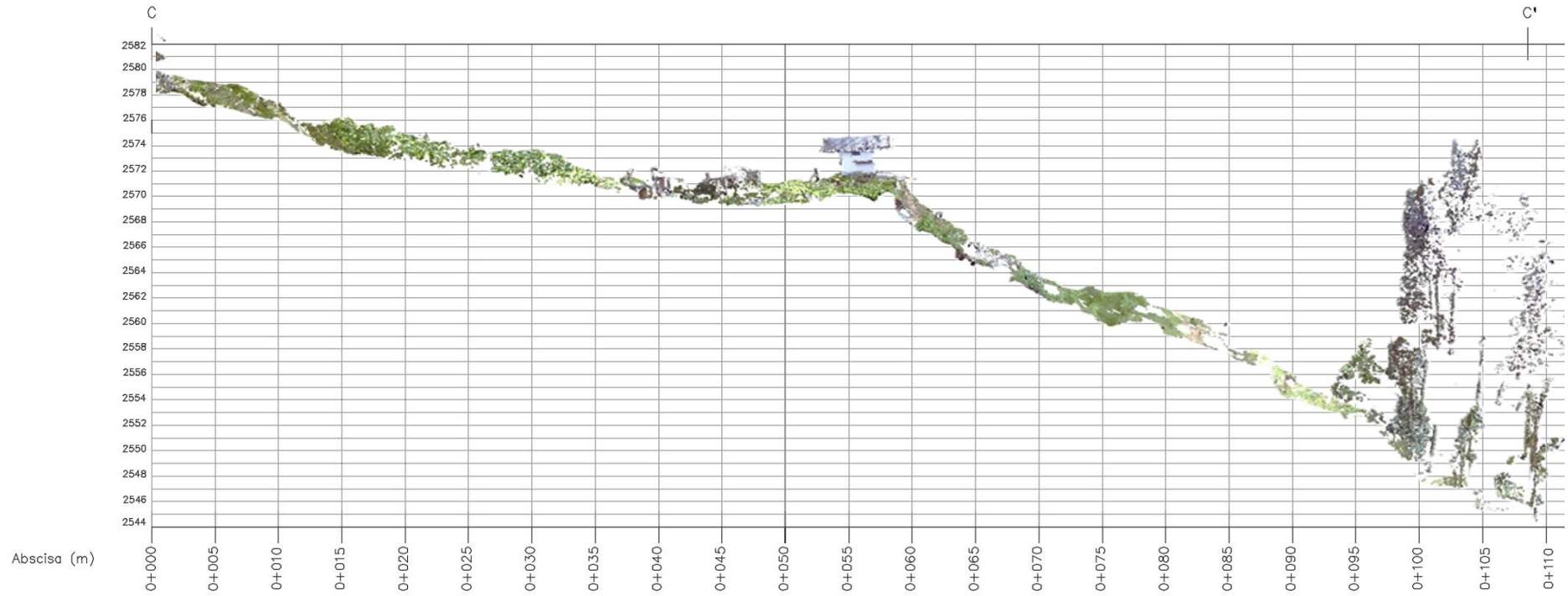
El perfil C-C' (Figura 5-9), muestra una dinámica similar a la del perfil A-A', aunque con algunas diferencias notables. Al igual que en el perfil A-A', se observa una menor intensidad en los movimientos del terreno en comparación con el perfil B-B', pero los mini-deslizamientos originados por los escarpes secundarios todavía tienen un impacto significativo. Estos mini-deslizamientos, aunque de menor magnitud, indican que el terreno sigue siendo susceptible a movimientos adicionales. La infiltración de agua en esta área sigue desempeñando un papel crucial, ya que la saturación del suelo provoca una pérdida de la resistencia del material, lo que facilita los desplazamientos. Como en el perfil A-A' (Figura 5-3), el decremento de la altura (30 cm) en la abscisa (0 + 015) sugiere que ha habido un desplazamiento significativo (al ser el escarpe principal del deslizamiento). Por otro lado, el hundimiento progresivo (10 cm a 20 cm) a lo largo de la abscisa (0 + 050 a 0 + 090) sigue siendo una característica destacada, lo que indica que la ladera continúa siendo susceptible a deslizamientos adicionales debido a la presencia persistente de agua en el suelo.

Figura 5-7. Perfil C-C' primer levantamiento (10 de mayo 2023)



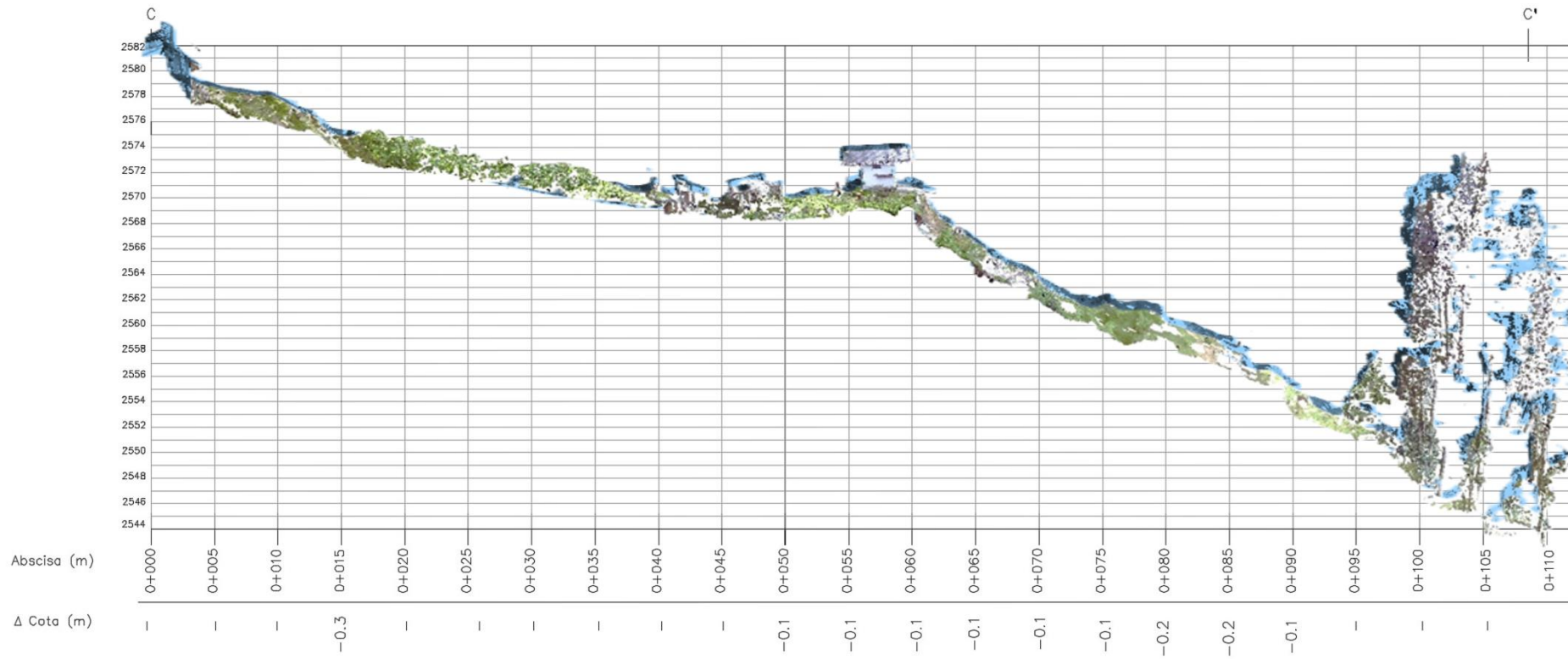
Fuente: La Autora

Figura 5-8. Perfil C-C' segundo levantamiento (19 de junio 2023)



Fuente: La Autora

Figura 5-9. Perfil C-C', Primer levantamiento (Azul) vs. Segundo levantamiento (RGB)



Fuente: La Autora

## 5.2. Propiedades físicas y mecánicas del suelo

### 5.2.1. Límites de Consistencia

Las tres muestras de suelo, tomadas a 2 metros de profundidad, fueron sometidas a pruebas de límites de consistencia para determinar sus propiedades plásticas y su comportamiento en función de la humedad. Esto permitió el cálculo del límite líquido (LL), límite plástico (PL) e índice de plasticidad (IP), la clasificación de suelos por su capacidad de deformación y comportamiento bajo varias condiciones de humedad. El límite líquido (LL), que es el valor de contenido de agua al cual el suelo se comporta en estados plástico y líquido, da una idea del comportamiento de liquidez del material cuando está saturado. El límite plástico (PL) es el contenido de agua al cual el suelo pasa de un estado semilíquido a plástico, representando la capacidad del suelo de ser moldeado sin agrietarse. Otro parámetro relevante es el índice de plasticidad (IP), el cual se define como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico ( $IP = LL - PL$ ); un IP mayor significa un comportamiento más plástico del suelo, lo que influye en la estabilidad y comportamiento del suelo en aplicaciones de ingeniería. Dos características principales que juegan un papel importante en la clasificación de suelos basados en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS) y el sistema AASHTO, evaluando el rendimiento del suelo bajo condiciones de carga y humedad.

Tabla 5-1. Resultados de ensayos de límites de consistencia

Límites de Consistencia			
Muestra	Límite Líquido (LL%)	Límite Plástico (LP%)	Índice de Plasticidad (IP%)
1	57	30	27
2	55	31	24
3	60	27	33

Fuente: La Autora

### 5.2.2. Clasificación de suelos

La clasificación de las tres muestras de suelo según los sistemas USCS y AASHTO se realizó a través de pruebas granulométricas y de plasticidad. Las muestras fueron clasificadas usando USCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) con un porcentaje

de material que pasa por el tamiz #200, límites de consistencia como límite líquido, LL, límite plástico, PL e índice de plasticidad, IP como función. Basado en las propiedades de plasticidad y granulometría, el sistema distingue entre suelos granulares (arena y grava) y suelos finos (limo y arcilla). En contraste, las muestras bajo el sistema AASHTO (Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y Transporte) fueron analizadas ampliamente basadas en el porcentaje que pasa el tamiz #200, el límite líquido y el índice de plasticidad (IP), donde el Índice de Grupo (IG) fue calculado para determinar la clasificación del suelo basada en su idoneidad para aplicaciones en obras viales, particularmente en cuanto a capas susceptibles para uso en subrasante, o como capa base de pavimento. Ambos sistemas arrojan una clasificación que es una evaluación completa de las propiedades físicas del suelo, lo que es esencial para describir la condición del terreno.

Tabla 5-2. Clasificación de suelos, sector Reina del Cisne - Paccha

Muestra	Método SUCS		Método AASHTO	
	Nomenclatura	Descripción	Nomenclatura	Descripción
1	CH	Arcilla alta plasticidad	A-7-5 (14)	Suelo Arcilloso (Pobre o malo)
2	CH	Arcilla alta plasticidad	A-7-5 (17)	Suelo Arcilloso (Pobre o malo)
3	CH	Arcilla alta plasticidad	A-7-6 (26)	Suelo Arcilloso (Pobre o malo)

Fuente: La Autora

### 5.2.3. Ensayo de Corte Directo

Se realizó una prueba de corte directo para obtener la resistencia al corte para las tres muestras, lo cual es una propiedad importante al evaluar la estabilidad del suelo en condiciones de carga. En esta prueba, se aplica una carga normal sobre la muestra de suelo, y a medida que se genera el esfuerzo cortante, la muestra falla, permitiendo la medición de la resistencia al corte en términos de cohesión ( $c$ ) y el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) del material. Los datos de resultado de cada muestra arrojaron un valor de cohesión, esto significa la fuerza del suelo contra el corte de fuerzas sin ser desplazado, y el ángulo de fricción interna que determina las fuerzas de corte que causan que las partículas del suelo se

deslicen, dependiendo de sus pendientes. Son utilizados para el diseño de estructuras geotécnicas ya que ayudan a predecir el comportamiento del suelo bajo esfuerzos y encontrar la estabilidad de un talud.

Tabla 5-3. Resultados de ensayo de Corte Directo, sector Reina del Cisne - Paccha

Ensayo de Corte Directo		
Muestra	Ángulo de fricción ( $\Phi$ )	Cohesión (C)
1	11°	0.39 kg/cm <sup>2</sup>
2	11°	0.34 kg/cm <sup>2</sup>
3	11°	0.35 kg/cm <sup>2</sup>

Fuente: La Autora

#### 5.2.4. Ensayo de Permeabilidad

El ensayo de permeabilidad con cabeza variable fue realizado en tres muestras de suelo extraídas, con el objetivo de determinar su capacidad de transmisión de agua bajo condiciones de flujo unidimensional. Es importante para evaluar los parámetros hidrológicos del suelo, especialmente en cuanto a la conductividad hidráulica no saturada bajo condiciones de carga constante. Se pasó un flujo constante de agua continuamente a través de cada muestra de suelo mientras se variaba la cabeza de agua durante la prueba, y se midió la tasa de flujo que pasaba a través de la muestra. El coeficiente de permeabilidad (k) de cada una de las muestras fue calculado a partir de estos datos, que expresa la tasa de agua que pasa a través del suelo como resultado de sus propiedades estructurales y la porosidad del material descrito. Basado en las tres muestras de suelo, este estudio proporciona información sobre la naturaleza/detalles de la variabilidad de permeabilidad del área de estudio, lo cual es significativo para el diseño de sistemas de drenaje, estabilidad de pendientes y recursos de agua en el regolito mixto [saturado/no saturado] y sus contribuciones. En evaluaciones geotécnicas, es significativo para predecir el comportamiento del suelo en situaciones de carga, así como para analizar cuánto absorbe o retiene el suelo agua.

Tabla 5-4. Resultados de ensayo de Permeabilidad, sector Reina del Cisne - Paccha

Ensayo de Permeabilidad	
Muestra	Coefficiente de Permeabilidad (k)
1	9.38E-05 cm/s
2	3.36E-05 cm/s
3	8.29E-05 cm/s

Fuente: La Autora

### 5.3. Geofísica

El análisis geofísico de los suelos muestra que los materiales principales en las primeras capas superficiales (0-12 metros de profundidad) son suaves y no consolidados (arcillas y limos), con resistividades que oscilan entre 5  $\Omega$ .m y 10  $\Omega$ .m, indicando una saturación de agua moderada. Estos suelos tienen una capacidad limitada para sostener tensiones de corte basada en las bajas velocidades de ondas de corte (150-200 m/s) y baja cohesión (10-20 kPa), haciéndolos más propensos a deslizamientos. Estos suelos son también de baja densidad (1200-1600 kg/m<sup>3</sup>), lo que contribuye a su inestabilidad. Con la profundidad, la velocidad de la onda de compresión alcanza gradualmente entre 0 y 1800 m/s, significando un proceso de compactación del suelo.

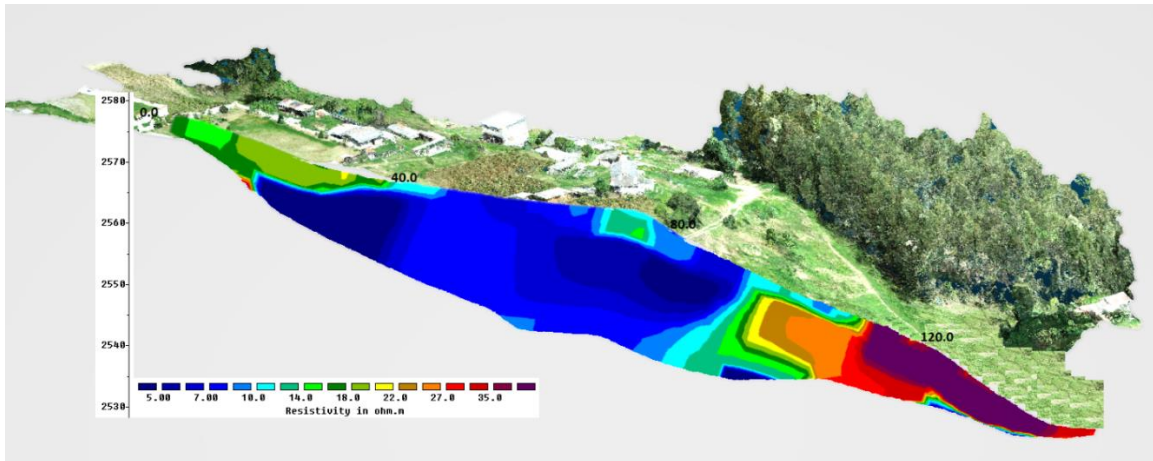
A una profundidad de 12 metros, las propiedades del suelo exhiben una mejora considerable, y según los datos, la velocidad de las ondas de corte se eleva a 350 m/s, revelando la existencia de materiales más compactados con mayor resistencia (gravas o incluso rocas). En contraste con estos materiales, más compactos (1900-2200 kg/m<sup>3</sup>), con una mayor cohesión (70-100 kPa) y ángulo de fricción (45-50°), sugieren que las capas más profundas son mucho más estables y con mayor capacidad para oponerse a fuerzas cortantes y zonas de compresión. Para encontrar mejor terreno para estructuras pesadas, se pueden realizar cimentaciones profundas por pocos metros si ocurren capas de suelo blando o respuesta de suelo blando, entonces su transición se convierte a una capa más fuerte que puede ser endosada ya que la demografía es una fase suave hacia abajo. En general, el perfil geofísico sugiere que las capas superficiales requerirán tratamientos especiales de cimentación debido a su débil resistencia, mientras que las capas más profundas proporcionan una base robusta y estable para la construcción.

Tabla 5-5. Parámetros geotécnicos mediante expresiones empíricas, sector Reina del Cisne - Paccha

Profundidad (m)	Resistividad ( $\Omega$ .m)	Velocidad de Onda (P-waves) (m/s)	Velocidad de Corte (S-waves) (m/s)	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)	Tipo de Material	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Interpretación Geofísica
0 - 2	5 - 10	0 - 200	150 - 200	Baja (c. 10-20)	Bajo (c. 10-20)	Arcillas  Limos	1200 - 1600	Capas superficiales con materiales blandos y poco consolidados, posiblemente arcillosos o limosos. Suelos con baja cohesión y fricción, susceptibles a asentamientos.
2 - 4	5 - 10	200 - 400	150 - 200	Moderada (c. 20-30)	Moderado (c. 20-25)	Arcillas  Limos	1300 - 1700	Incremento en la velocidad de onda de compresión, indicando mayor compactación. La cohesión y el ángulo de fricción moderado sugieren mayor resistencia al deslizamiento.
4 - 6	5 - 10	400 - 600	150 - 200	Moderada (c. 30-40)	Moderado (c. 25-30)	Arcillas  Limos	1400 - 1800	Mayor compactación y posible presencia de capas ligeramente consolidadas, pero sigue siendo susceptible a movimientos.
6 - 8	5 - 10	600 - 800	150 - 200	Moderada (c. 40-50)	Moderado (c. 30-35)	Arcillas  Gravas	1500 - 1900	Suelo más denso, con una ligera mejora en la resistencia al esfuerzo de corte. La cohesión y el ángulo de fricción siguen siendo moderados.
8 - 10	5 - 10	800 - 1000	150 - 200	Alta (c. 50-60)	Moderado (c. 35-40)	Gravas	1600 - 2000	Aumento en la velocidad de onda de compresión, indicando una mayor densidad. La cohesión mejora, aunque la resistencia al corte aún es baja comparado con capas más profundas.
10 - 12	5 - 10	1000-1200	150 - 200	Alta (c. 60-70)	Alto (c. 40-45)	Gravas	1700 - 2100	Mayor compactación de las capas superficiales con un aumento en la cohesión y resistencia al corte. El ángulo de fricción sigue aumentando con la profundidad.
12 - 40	5 - 10	1200-1800	350	Muy Alta (c. 70-100)	Alto (c. 45-50)	Roca	1900 - 2200	Materiales más consolidados o rocosos a mayor profundidad, con mayor cohesión y fricción, proporcionando una base más estable para la construcción.

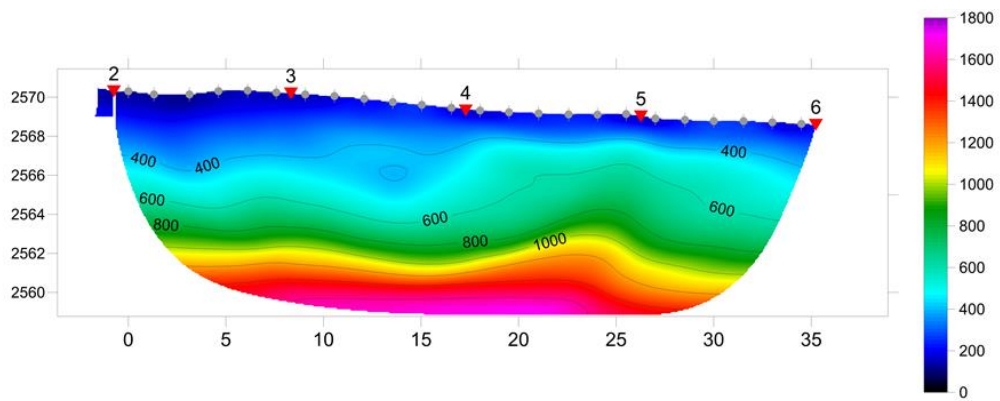
Fuente: (Asteris et al., 2020)

Figura 5-10. Tomografía eléctrica, sector Reina del Cisne - Paccha



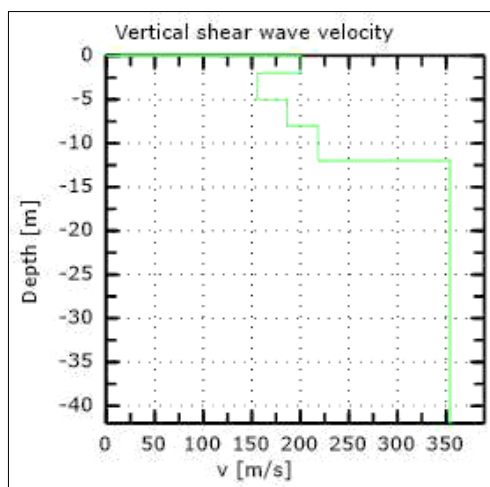
Fuente: La Autora

Figura 5-11. Tomografía sísmica, sector Reina del Cisne - Paccha



Fuente: La Autora

Figura 5-12. Velocidad vertical de ondas de corte, sector Reina del Cisne - Paccha

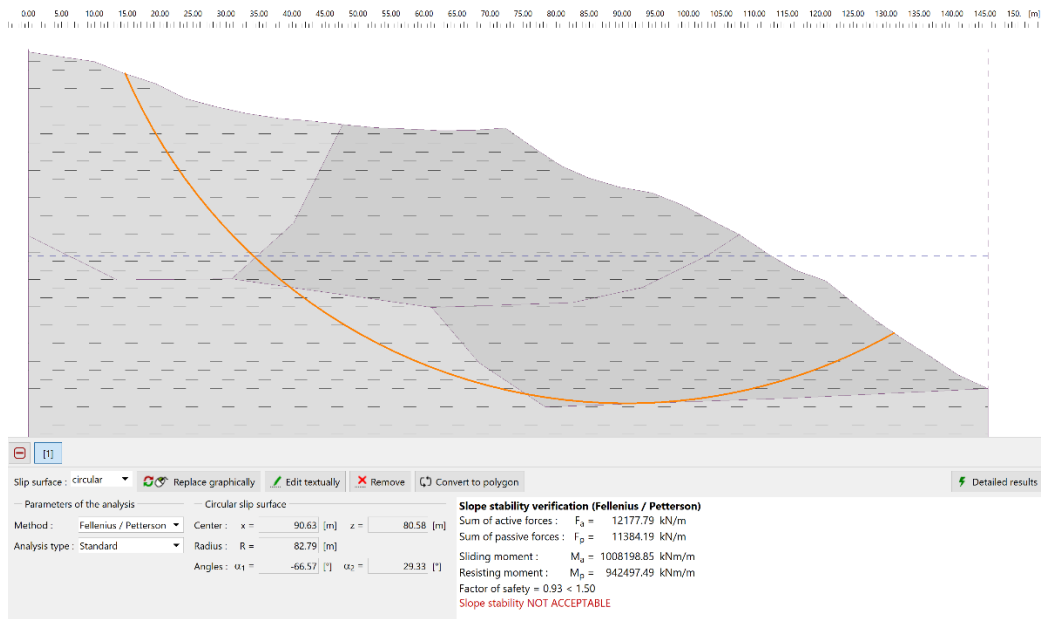


Fuente: La Autora

#### **5.4. Factor de seguridad en condiciones normales y con aceleración sísmica**

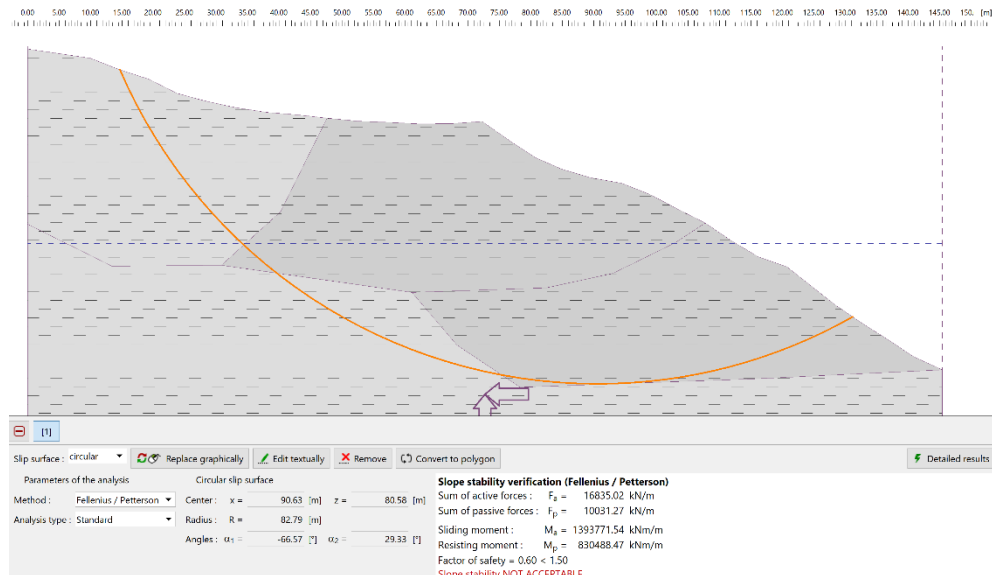
Los factores de seguridad (FS) obtenidos en el estudio geotécnico—0.93 en condiciones secas y húmedas (Figura 5-13), y 0.6 bajo aceleración sísmica (Figura 5-14)—indican un alto riesgo de falla en la ladera, ya que un FS inferior a 1 sugiere que las fuerzas desestabilizadoras superan a las resistentes, lo que implica una condición de inestabilidad inminente (Ortiz, 2014). De acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción: Geotecnia y Cimentaciones (NEC-SE-GC), los análisis de estabilidad de taludes deben considerar tanto la resistencia al corte de los materiales del suelo como las cargas dinámicas inducidas por eventos sísmicos, estableciendo valores de FS mínimos recomendados superiores a 1.3 en condiciones estáticas y 1.1 en condiciones sísmicas (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2023). Adicionalmente, investigaciones previas han demostrado que valores inferiores a estos umbrales aumentan significativamente la probabilidad de deslizamiento, especialmente en zonas de alta sismicidad, donde los efectos de licuefacción y degradación de la resistencia pueden agravar la pérdida de estabilidad (Duncan & Wright, 2005).

Figura 5-13. F.S. de la ladera en condiciones normales de humedad (F.S. = 0.93)



Fuente: La Autora

Figura 5-14. F.S. de la ladera en condiciones normales de humedad con aceleración sísmica  $K_h = 0,125$  y  $K_v = 0,0625$  (F.S. = 0.6)



Fuente: La Autora

## Capítulo 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los tres perfiles geotécnicos analizados muestran variaciones en la intensidad de los deslizamientos, pero todos destacan el papel crucial de la infiltración de agua en la desestabilización del terreno. El perfil A-A' presenta una estabilización parcial en ciertas áreas, aunque los hundimientos progresivos sugieren deslizamientos activos en otras zonas. En el perfil B-B', los movimientos del terreno son más pronunciados, con una mayor vulnerabilidad debido a la saturación del suelo y los mini-deslizamientos. El perfil C-C' exhibe el mismo comportamiento dinámico, con el agua anteriormente infiltrada y los deslizamientos de tierra asociados comprometiendo el área aún más. La infiltración de agua y la presencia de escarpas secundarias fueron factores determinantes para la inestabilidad de la pendiente, los cuales deben ser controlados y monitoreados para una estabilidad futura.
- Los hallazgos del estudio de estabilidad con Slide corroboran que la ladera presenta inestabilidad e insegura. Dado que los valores obtenidos en este estudio no cumplen con los criterios de seguridad establecidos por normativas nacionales, es imperativo implementar medidas correctivas, tales como el refuerzo del talud mediante muros de contención, el uso de anclajes o geotextiles, y la mejora del drenaje superficial y subterráneo para evitar la acumulación de agua, que puede reducir aún más la resistencia al corte del suelo y acelerar el proceso de falla
- Las muestras principales fueron tomadas de muestras presentes en la plataforma de la Formación Azogues, donde las propiedades mecánicas del suelo podrían mejorar a mayor profundidad, enfocándose en materiales más compactos. Las características determinadas a partir de las muestras extraídas; como: cohesión y ángulo de fricción muestran una baja resistencia al corte en los suelos superficiales, lo cual es propenso al asentamiento y deslizamiento de tierra. Además, los granos morterizados con agua dentro de los suelos pueden afectar su comportamiento mecánico, lo que podría reducir notablemente la cohesividad e incrementar la inestabilidad. Finalmente, tenía una baja permeabilidad al flujo, lo que indica que la infiltración es lenta, haciendo más probable que permanezca en la superficie y en la capa de suelo superior. El empuje puede disminuir la fricción y coherencia del suelo, lo cual, a su vez, genera la pendiente; esto puede resultar en inestabilidad de la pendiente. Todos estos factores apuntan hacia la necesidad de algunas medidas adicionales de estabilización

y correcciones de infiltración de agua para ayudar a mejorar las propiedades de carga y, en última instancia, la seguridad estructural.

- El análisis geofísico de los suelos indica que las capas superficiales iniciales (0-12 metros) son principalmente suelos frágiles y mal consolidados, lo que se evidencia por resistividades bajas y velocidades de onda de corte bajas. Estos materiales son de baja capacidad, lo que conduce a asentamientos y deslizamientos de tierra, sugiriendo la necesidad de técnicas de cimentación especializadas. Debajo de una profundidad de 12 metros, las propiedades del suelo pueden variar. La velocidad de la onda de corte puede aumentar ya que están presentes materiales consolidados (grava, roca). Así que cuanto más profundo vayamos, más estabilidad tenemos y mayor capacidad para soportar estructuras pesadas. En general, estos resultados sugieren que las capas superficiales son más susceptibles y deberían abordarse con cautela, mientras que las capas más profundas proporcionan una base sólida para la construcción.
- Los resultados obtenidos en esta investigación ponen en evidencia que en la zona de estudio se están produciendo asentamientos diferenciales debido a la saturación del suelo, generada principalmente por las descargas directas de aguas servidas y el vertido de aguas residuales domésticas hacia el terreno. Este proceso compromete la estabilidad del suelo, ya que la saturación excesiva afecta su compactación y promueve la remoción de partículas finas, lo que genera vacíos en la estructura del suelo. Con el tiempo, estos vacíos provocan hundimientos y asentamientos diferenciales que comprometen la estabilidad de las edificaciones ubicadas en la superficie.
- A largo plazo, estos procesos pueden transformarse en movimientos de masa debido a la estructura geológica del terreno, que consiste en capas de materiales con diferentes propiedades mecánicas. La infiltración de agua en las capas superficiales de material suelto puede ocurrir a niveles más profundos hasta estratos resistentes que actúan como planos de falla. Esta ruta permite que el material superior se deslice sobre ella e inicie inestabilidades geotécnicas, lo que puede tener un fuerte impacto en la seguridad del área.
- Los métodos de levantamiento basados en teledetección permiten una herramienta efectiva y precisa para el análisis y control de deslizamientos de tierra. Los resultados

obtenidos son prometedores y proporcionan información valiosa para la gestión de riesgos geotécnicos, pero cabe mencionar que esta metodología está siendo refinada. Los datos de deslizamientos de tierra tienen un gran potencial a este respecto, y en las siguientes secciones presentamos que todavía hay mucho espacio para mejorar la interpretación de estos datos y para la integración de estos datos con otras herramientas geoespaciales disponibles para permitir una mejor comprensión de los riesgos que provienen de los deslizamientos de tierra. En resumen, aunque los avances hasta ahora son inmensamente importantes, sigue siendo esencial explorar nuevas aplicaciones y avances en su resolución para asegurar una utilidad óptima con respecto a la prevención y mitigación de desastres naturales.

- Es fundamental complementar los resultados por teledetección con análisis geofísicos y estudios geotécnicos para obtener una evaluación integral de las condiciones del suelo y garantizar una mayor precisión en la identificación de riesgos potenciales, como deslizamientos de tierra. Mientras que los métodos geofísicos proporcionan valiosa información sobre la estructura y propiedades del subsuelo, como la resistividad y las velocidades de ondas de corte, los estudios geotécnicos permiten analizar directamente las características mecánicas del suelo, como la cohesión, la fricción y la permeabilidad. La combinación de información de ambas metodologías, teledetección y geotecnia, proporciona una comprensión más completa de cómo se comporta el terreno visualmente bajo diversas condiciones y cargas, un conocimiento crucial que se necesita para el diseño de cimentaciones y para formular las estrategias de mitigación de riesgos más efectivas.
- Los hallazgos de este estudio destacan la necesidad de desarrollar estrategias específicas de prevención y mitigación de deslizamientos:
  - Se recomienda la implementación de un sistema integral de drenaje que regule la acumulación de humedad en las capas superficiales.
  - Refuerzo de los taludes mediante muros de contención, anclajes y geotextiles puede mejorar la estabilidad del terreno.
  - La combinación de tecnologías de teledetección con estudios geotécnicos permitirá el monitoreo continuo de la evolución de la pendiente, lo que permitirá la detección temprana de cambios en la estabilidad y el uso oportuno de acciones correctivas.

- Estas estrategias no solo reducirán el riesgo de deslizamientos, sino que también contribuirán a la planificación sostenible del territorio y la protección de infraestructuras y comunidades vulnerables.

## Capítulo 7: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abellán, A., Pizarro, J., & Pons, J. (2010). Monitoring landslide displacements with terrestrial laser scanning. *Geomorphology*, 118(3-4), 277-287. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.01.014>
- Arco, J. (2010). *Terrestrial Laser Scanning: Principles and Applications*. Springer.
- Arévalo, J., & Castillo, P. (2019). Climatología de los pisos altitudinales en los Andes ecuatorianos. *Revista de Geociencias Andinas*, 14(2), 45-53.
- Asteris, P., et al. (2020). Geophysical Investigations for Soil Stability Analysis in Civil Engineering Applications. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(8), 04020081. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002315.
- Aydan, Ö., & Kawamoto, T. (1992). The stability of slopes and underground openings against flexural toppling and their stabilization. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 25(3), 143-165.
- Bernardini, F., & Rushmeier, H. (2002). A model for surface reconstruction from unorganized point clouds. *ACM Transactions on Graphics*, 21(3), 502-530. <https://doi.org/10.1145/566654.566653>
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Bromhead, E. N. (2013). *Landslide mechanisms and risk management*. CRC Press.
- Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., & Charlton, M. (2019). Spatial analysis of LiDAR data for environmental monitoring. *Geographical Analysis*, 51(2), 121-140. <https://doi.org/10.1111/gean.12145>
- Casagli, N., Cigna, F., Bianchini, S., Righini, G., Nolesini, T., Del Conte, S., ... & Ferretti, A. (2017). Landslide mapping and monitoring by using radar and optical remote sensing: Examples from the ESA SAR-Based Landslide Mapping Services. *Landslides*, 14(3), 1107-1122.
- Chau, K. T., & Chan, J. K. (2005). Use of multivariate techniques for analyzing landslide susceptibility. *Journal of Geotechnical Engineering*, 131(9), 1101-1111.
- Clayton, C. R. I. (1995). *Site Investigation: A Handbook for Engineers*. Blackwell Science.
- Coduto, D. P., Yeung, M. C., & Kitch, W. A. (2011). *Geotechnical engineering: Principles and practices* (2nd ed.). Pearson Education.

- Corominas, J., & Moya, J. (1999). Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in the eastern Pyrenees. *Geomorphology*, 30(1-2), 79-93.
- Correa Palacios, P., Martínez, C., & Ariza, L. (2019). Geotechnical and hydrological analysis of landslides in tropical mountain environments. *Journal of Geotechnical Engineering*, 145(2), 1-12.
- Craig, R. F. (2004). *Soil mechanics* (7th ed.). Spon Press.
- Crosta, G. B., & Agliardi, F. (2003). Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(1), 176-191.
- Crozier, M. J. (2010). Landslide geomorphology: An argument for recognition, with examples from New Zealand. *Geomorphology*, 3(2), 8-13.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide types and processes*. Transportation Research Board Special Report, 247.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Vrin.
- Das, B. M. (2010). *Principles of Geotechnical Engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2016). *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning.
- Delacourt, C., Avouac, J. P., & Allard, M. (2007). Terrestrial laser scanning for monitoring mass movements: A case study of the Chaîne des Puys, France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(4), 571-583. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-571-2007>
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Espinoza, J., Torres, M., & Quiroga, P. (2020). Estudio de la vulnerabilidad de las viviendas en zonas de riesgo de deslizamientos en el sur del Ecuador. *Revista de Gestión Ambiental y Riesgos*, 5(3), 45-60.
- Faro. (2023). *FARO® Laser Scanner Focus3D Manual*. Retrieved from <https://www.faro.com>
- GAD Azuay. (2015). *Plan de Ordenamiento Territorial de la Provincia del Azuay*. Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial del Azuay. Recuperado de <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/revistageoespacial/article/download/1353/970/4800>

- Gariano, S. L., & Guzzetti, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227-252.
- González, J., Pérez, M., & Rodríguez, L. (2021). Análisis deformativo estructural por deslizamiento en el sector Reina del Cisne, parroquia Paccha, mediante escaneos con LiDAR y software CloudCompare. *Revista de Ingeniería Geotécnica*, 15(2), 45-60.
- Gupta, A., & Tiwari, V. (2019). *Geology of the Andes*. Springer.
- Gupta, N., & Tiwari, G. (2019). Vulnerability of mountainous regions to landslides: A case study from Ecuador. *International Journal of Geosciences*, 10(1), 45-58.
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112(1-2), 42-66.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., & Ardizzone, F. (2003). The use of aerial photographs and satellite imagery to map landslides at different scales. *Geomorphology*, 54(1-2), 147-161.
- Head, K. H. (2006). *Manual of soil laboratory testing. Volume 1: Soil classification and compaction tests*. Whittles Publishing.
- Highland, L., & Bobrowsky, P. (2008). *The Landslide Handbook—A Guide to Understanding Landslides*. U.S. Geological Survey Circular.
- Hodgson, M. E., Kelly, M., & Hoffer, R. (2005). LiDAR-based data processing for environmental applications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(9), 1037-1043. <https://doi.org/10.14358/PERS.71.9.1037>
- Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.
- Iverson, R. M. (1997). The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, 35(3), 245-296.
- Jaboyedoff, M., Oppikofer, T., & Abellán, A. (2012). Use of LIDAR in landslide investigations: A review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 249-267.
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1979). *Soil mechanics*. Wiley.
- Loke, M. H. (2000). *Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2D and 3D surveys*. Geotomo Software.

- Louie, J. N. (2001). Faster, better: Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2), 347-364.
- MAGAP. (2018). Evaluación de la susceptibilidad a deslizamientos en la provincia del Azuay. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca.
- Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., & Gabbianelli, G. (2013). Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing*, 5(12), 6880-6898.
- MIDUVI, C. (2015). Norma ecuatoriana de la construcción: riesgo sísmico diseño sismo resistente NEC-SE-DS.
- Miller, R. D., Xia, J., & Park, C. B. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *Leading Edge*, 18(12), 1392-1396.
- Mora, M., Santana, J., & Reyes, D. (2021). Evaluación de la vulnerabilidad ante deslizamientos en comunidades andinas: Un enfoque integral. *Revista de Ingeniería Geotécnica*, 29(4), 245-259.
- Mora, S., & Vahrson, W. (1992). Método para la evaluación de amenazas en deslizamientos en zonas tropicales. *Revista Geotécnica*, 22(3), 215-230.
- Municipio de Cuenca. (2020). Informe técnico sobre el estado actual de edificaciones en el sector Reina del Cisne. Cuenca, Ecuador: Municipio de Cuenca.
- O'Neill, A. (2003). The Microtremor Survey Method: Uses and Limitations. *Exploration Geophysics*, 34(2), 20-30.
- Okada, H. (2003). The microtremor survey method. *Society of Exploration Geophysicists*.
- Palenzuela, J., De Vicente, G., & Llorente, J. (2013). The use of terrestrial laser scanning in the study of landslides: Applications and limitations. *Engineering Geology*, 155, 60-72. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.09.017>
- Petley, D. (2012). Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*, 40(10), 927-930.
- Rocca, M., Gennaro, C., & Gonfiantini, L. (2008). Landslides in the Italian Apennines: Processes, mechanisms and monitoring. *Engineering Geology*, 101(3-4), 191-204. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.01.012>

- Rosenqvist, A., & Shimada, M. (2007). A new L-band SAR system for the Earth observation satellite ALOS. *Earth Observing Systems VII*, 6418, 64180D.
- Santamaría, R. (2015). *Vulnerabilidad estructural ante deslizamientos en zonas urbanas*. Universidad de Cuenca.
- Sanchez, J., & Rodriguez, L. (2015). Geotechnical and environmental factors in landslides. *Engineering Geology*, 104(1), 1-15.
- Sassa, K. (2005). Mechanisms and processes in landslides. In *Landslides: Disaster risk reduction* (pp. 105-132). Springer.
- Sato, S., & Ishihara, M. (2010). Monitoring of a large landslide by using radar remote sensing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(6), 832-840.
- Schuster, R. L. (2001). *Landslides: Investigation and mitigation*. National Research Council. National Academy Press.
- Shannon, C., & Weaver, W. (1949). *The mathematical theory of communication*. University of Illinois Press.
- Sills, S., & Kappes, M. (2009). Application of GIS in landslide hazard assessment. *Journal of Environmental Management*, 90(3), 191-202.
- Suarez Diaz, J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, Ingeniería de Suelos.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice* (2nd ed.). Wiley.
- Varnes, D. J. (1984). *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. UNESCO Press

## ANEXOS

### Anexo Fotográfico:



Extracción de muestras



Preparación de muestras para lavado



Muestras lavadas para Granulometría



Proceso de ensayos de Límites de Consistencia




Muestra para ensayo de Corte Directo



Muestras de ensayo de corte Directo luego de secado

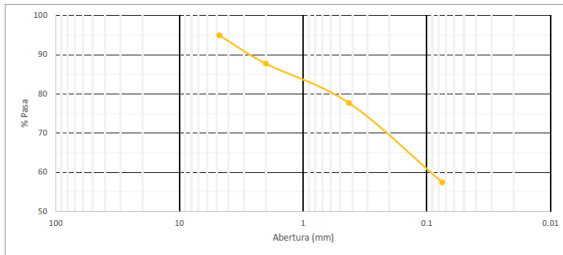
# Anexo de Laboratorio:

 <b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL</b> LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	
<b>CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS</b>	
PROYECTO:	Tesis Pamela Carolina Pesántez Cabrera
MUESTRA:	Arriba
SOLICITADO POR :	
FECHA:	Octubre 2024

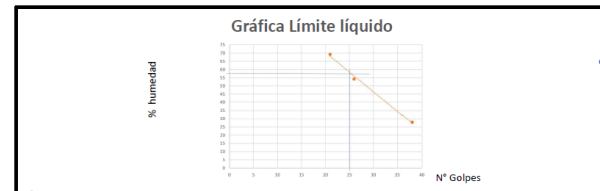
TAMIZ N°	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gramos)	PESO RET. ACUMULADO (gramos)	% RETENIDO	% PASA	ESPECIFICACIONES NORMA	
						LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR
3"	76.2						
2 1/2"	63.5						
2"	50.8						
1 1/2"	38.1						
1"	25.4						
3/4"	19.1						
1/2"	12.7						
3/8"	9.52						
N#4	4.76	57.8	57.8	5.094	94.906		
PASA No4 (Fondo)		0					
10	2	81.5	139.3	12.277	87.723		
40	0.42	113.9	253.2	22.316	77.684		
200	0.074	229.6	482.8	42.552	57.448		
FONDO		0.5					
TOTAL		0					

Peso antes del ensayo (gramos) =	1134.6
Peso después del ensayo (gramos) =	483.3

CURVA GRANULOMÉTRICA



LÍMITE LÍQUIDO			
N° Golpes	38	26	21
Recipiente N°	1	2	3
Recipiente + M. Húmeda	28.4	31.7	33.6
Recipiente + M. Seca	26	24.3	24.7
Peso Recipiente	12.3	12.3	12.3
% Humedad	27.81	54.27	69.16



LÍMITE PLÁSTICO			
Recipiente N°	1	2	3
Recipiente + M. Húmeda	15.6	16.8	14.1
Recipiente + M. Seca	14.3	15.7	13.1
Peso Recipiente	11	13.1	10.9
% Humedad	30.3	30.77	30

RESUMEN	
LL %	57
LP %	30
IP %	27

HUMEDAD NATURAL	
Peso anillo (gr)	151.6
Lado anillo (cm)	6.2
Alto anillo (cm)	2.1
Volumen anillo (cm³)	80.724

Peso muestra húmeda + anillo (gr)	309.3
Peso muestra húmeda (gr)	157.7
Peso muestra seca + tara (gr)	
Peso muestra seca (gr)	135.2


Humedad de la muestra (%)	16.64
Peso específico húmedo (gr/cm³)	1.95
Peso específico seco (gr/cm³)	1.67



Firmado electrónicamente por:  
**MARCOS DARIO GONZALEZ MALDONADO**

TUTOR: Ing. Marcos González

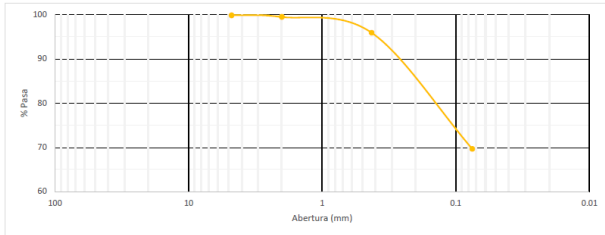
CLASIFICACIÓN		
	Nomenclatura	Descripción
SUCS	CH	Arcilla alta plasticidad
AASHTO	A-7-5 (14)	Suelo Arcilloso (Pobre o malo)

	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL</b>	
	LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	
<b>CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS</b>		
PROYECTO:	Tesis Pamela Carolina Pesántez Cabrera	
MUESTRIA:	Centro	
SOLICITADO POR :		
FECHA:	Octubre 2024	

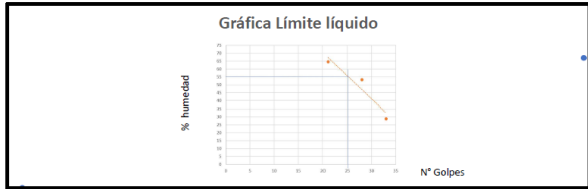
TAMIZ Nº	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gramos)	PESO RET. ACUMULADO (gramos)	% RETENIDO	% PASA	ESPECIFICACIONES NORMA	
						LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR
3"	76.2						
2 1/2"	63.5						
2"	50.8						
1 1/2"	38.1						
1"	25.4						
3/4"	19.1						
1/2"	12.7						
3/8"	9.52						
Nº4	4.76	1	1	0.121	99.879		
<b>PASA Nº4 (Fondo)</b>							
		0					
10	2	3	4	0.483	99.517		
40	0.42	29.6	33.6	4.056	95.944		
200	0.074	217.6	251.2	30.320	69.680		
FONDO		1.2					
TOTAL		0					

Peso antes del ensayo (gramos) =	828.5
Peso después del ensayo (gramos) =	252.4

CURVA GRANULOMÉTRICA



LÍMITE LÍQUIDO			
Nº Golpes	33	28	21
Recipiente N°	1	2	3
Recipiente + M. Húmeda	27.1	24.5	30.5
Recipiente + M. Seca	23.8	20.3	23.4
Peso Recipiente	12.4	12.4	12.4
% Humedad	28.95	53.16	64.55



LÍMITE PLÁSTICO			
Recipiente N°	1	2	3
Recipiente + M. Húmeda	26	11.7	24.2
Recipiente + M. Seca	25	11.3	23.6
Peso Recipiente	21.8	10	21.6
% Humedad	31.25	30.77	30

RESUMEN	
LL %	55
LP %	31
IP %	24

HUMEDAD NATURAL	
Peso anillo (gr)	151.6
Lado anillo (cm)	6.2
Alto anillo (cm)	2.1
Volumen anillo (cm³)	80.724

Peso muestra húmeda + anillo (gr)	305.4
Peso muestra húmeda (gr)	153.8
Peso muestra seca + tara (gr)	
Peso muestra seca (gr)	123.8


Humedad de la muestra (%)	24.23
Peso específico húmedo (gr/cm³)	1.91
Peso específico seco (gr/cm³)	1.53



Firmado electrónicamente por:  
**MARCOS DARIO GONZALEZ MALDONADO**

TUTOR: Ing. Marcos González

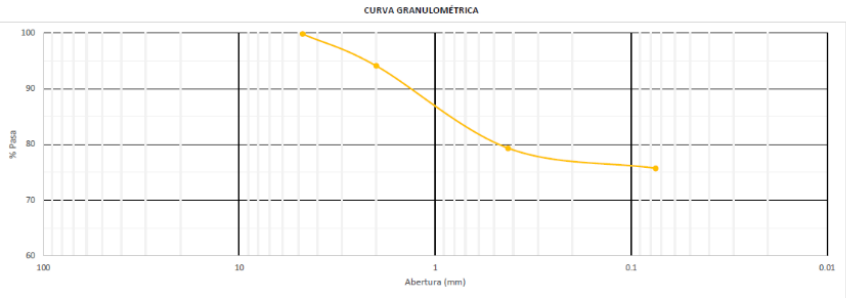
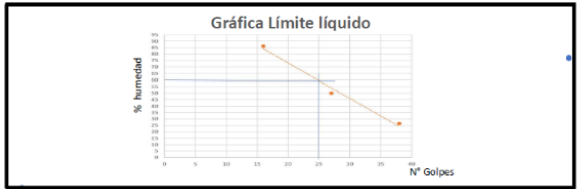
CLASIFICACIÓN		
SUCS	Nomenclatura	Descripción
SUCS	CH	Arcilla alta plasticidad
AASHTO	A-7.5 (17)	Suelo Arcilloso (Pobre o malo)

	<b>FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL</b>	
	LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN	
<b>CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS</b>		
PROYECTO:	Tesis Pamela Carolina Pesántez Cabrera	
MUESTRA:	Abajo	
SOLICITADO POR :		
FECHA:	Octubre 2024	

TAMIZ Nº	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gramos)	PESO RET. ACUMULADO (gramos)	% RETENIDO	% PASA	ESPECIFICACIONES NORMA	
						LÍMITE SUPERIOR	LÍMITE INFERIOR
3"	76.2						
2 1/2"	63.5						
2"	50.8						
1 1/2"	38.1						
1"	25.4						
3/4"	19.1						
1/2"	12.7						
3/8"	9.52						
Nº4	4.76						
<b>PASA Nº4 (Fondo)</b>							
10	2	56.6	58.1	5.877	94.123		
40	0.42	146.2	204.3	20.665	79.335		
200	0.074	35.7	240	24.276	75.724		
<b>FONDO</b>		2					
<b>TOTAL</b>							

Peso antes del ensayo (gramos) =	988.63
Peso después del ensayo (gramos) =	242

LÍMITE LÍQUIDO			
Nº Golpes	38	27	16
Recipiente N°	1	2	3
Recipiente + M. Húmeda	35.5	30.2	37.3
Recipiente + M. Seca	30.5	23.4	29.8
Peso Recipiente	11.7	12.3	21.1
% Humedad	26.6	50	86.21



LÍMITE PLÁSTICO			
Recipiente N°	1	2	3
Recipiente + M. Húmeda	25.4	6.5	9
Recipiente + M. Seca	24.7	6	8.5
Peso Recipiente	22.1	4.2	6.6
% Humedad	26.92	27.78	26.32

RESUMEN	
LL %	60
LP %	27
IP %	33

HUMEDAD NATURAL	
Peso anillo (gr)	122.4
Lado anillo (cm)	6.3
Alto anillo (cm)	2.1
Volumen anillo (cm³)	83.349

Peso muestra húmeda + anillo (gr)	258.1
Peso muestra húmeda (gr)	135.7
Peso muestra seca + tara (gr)	
Peso muestra seca (gr)	109.1

Humedad de la muestra (%)	24.38
Peso específico húmedo (gr/cm³)	1.63
Peso específico seco (gr/cm³)	1.31



Firmado electrónicamente por:  
**MARCOS DARIO GONZALEZ MALDONADO**

TUTOR: Ing. Marcos González

CLASIFICACIÓN		
SUCS	Nomenclatura	Descripción
CH	CH	Arcilla alta plasticidad
AASHTO	A-7-6 (26)	Suelo Arcilloso (Pobre o malo)

## LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

CÓDIGO

REVISIÓN No.  
FECHA REVISIÓN

### ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR

FECHA DE IMPRESIÓN	2025-02-25	No. ENSAYO	MATERIAL
FECHA DE ENSAYO	2024-11-19	808	Indeterminado

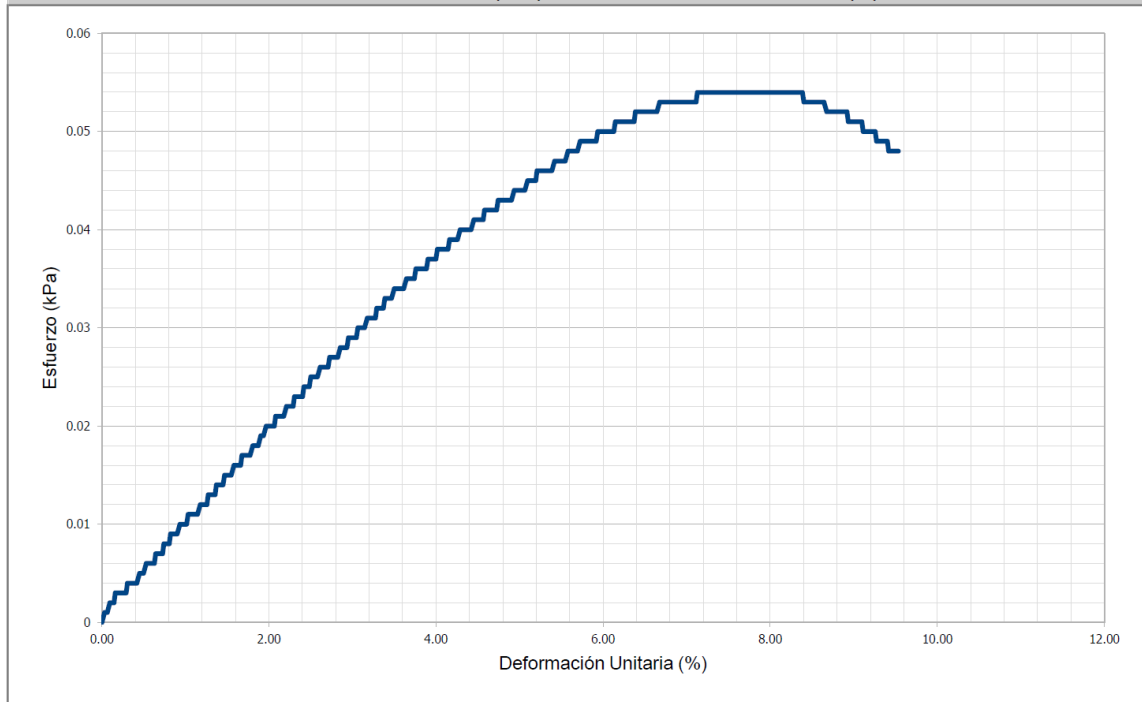
#### INFORMACIÓN GENERAL

ID. MUESTRA	ARRIBA 1		
CLIENTE			
PROYECTO	Tesis de Pamela Pesántez		

#### ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO

Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)
62	5.91	9.532	0
Área (mm <sup>2</sup> )	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	
3844	208.4	0.054	

#### GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)



OBSERVACIONES:



MARCOS DARIO GONZALEZ MALDONADO

TUTOR

Ing. Marcos González



# LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

CÓDIGO

REVISIÓN No.  
FECHA REVISIÓN

## ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR

FECHA DE IMPRESIÓN	2025-02-25	No. ENSAYO	MATERIAL
FECHA DE ENSAYO	2024-11-19	809	Indeterminado

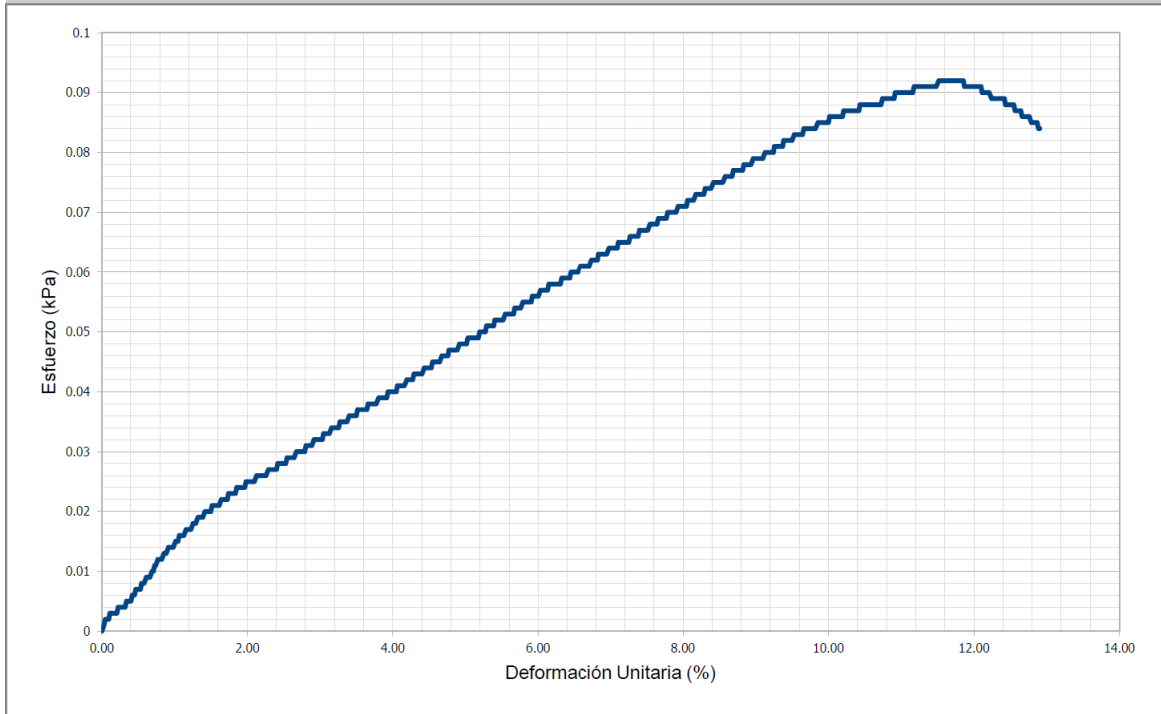
### INFORMACIÓN GENERAL

ID. MUESTRA	ARRIBA 2
CLIENTE	
PROYECTO	Tesis de Pamela Pesántez

### ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO

Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)
62	8.01	12.919	0
Área (mm <sup>2</sup> )	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	
3844	352.8	0.092	

### GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)



OBSERVACIONES:



Elaborado por:  
MARCOS DARIO  
GONZALEZ MALDONADO

TUTOR

Ing. Marcos González



## LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

CÓDIGO

REVISIÓN No.  
FECHA REVISIÓN

### ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR

FECHA DE IMPRESIÓN	2025-02-25	No. ENSAYO	MATERIAL
FECHA DE ENSAYO	2024-11-19	810	Indeterminado

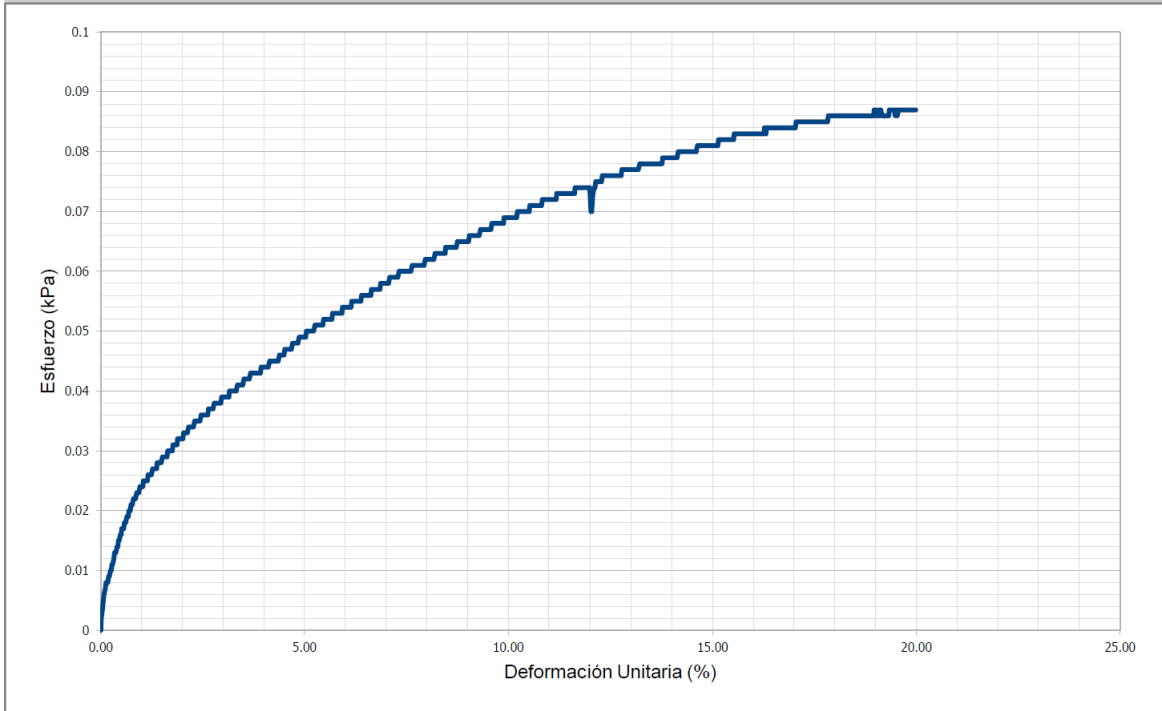
### INFORMACIÓN GENERAL

ID. MUESTRA	ARRIBA 2
CLIENTE	
PROYECTO	Tesis de Pamela Pesántez

### ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO

Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)
62	12.4	20	0
Área (mm <sup>2</sup> )	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	
3844	333.6	0.087	

### GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)



OBSERVACIONES:



MARCOS DARÍO  
GONZÁLEZ MALDONADO

TUTOR

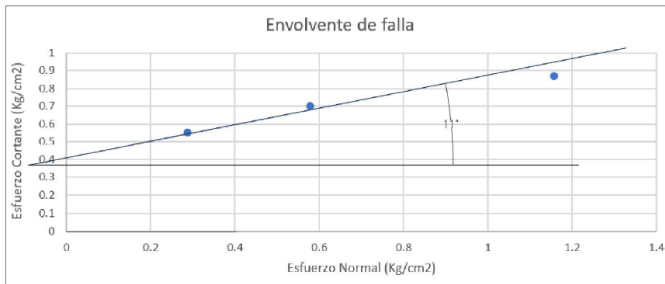
Ing. Marcos González

CORTE DIRECTO

PROYECTO:	
MUESTRA:	Tesis Pamela Carolina Pesántez Cabrera
SOLICITADO POR :	Arriba
FECHA:	Noviembre 2024

DATOS	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3
Peso anillo (gr)	151.6	151.6	151.5
Lado anillo (cm)	6.2	6.2	6.2
Alto anillo (cm)	2.1	2.1	2.1
Volumen anillo (cm <sup>3</sup> )	80.724	80.724	80.724
Peso muestra humeda + anillo (gr)	310.2	309.3	308.6
Peso muestra humeda (gr)	158.6	157.7	157.1
Peso muestra seca (gr)	136.1	135.2	134.7
Humedad de la muestra (%)	16.53	16.64	16.63
Peso específico humedo (gr/cm <sup>3</sup> )	1.96	1.95	1.95
Peso específico seco (gr/cm <sup>3</sup> )	1.69	1.67	1.67

Ensayo	Carga Normal (KG)	Lado prom (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	Lado corregido (cm)	Area corregida (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Normal (Kg/cm <sup>2</sup> )	Carga Cortante (N)	Carga Cortante (Kg)	Esf. Cortante (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	10	6.2	38.44	5.609	34.78	0.287556289	208.4	21.24362895	0.552643833
2	20	6.2	38.44	5.58	34.60	0.578101515	264.6	26.97247706	0.701677343
3	40	6.2	38.44	5.58	34.60	1.156203029	328.6	33.49643221	0.871395219



Resultados		
$c' =$	0.39	kg/cm <sup>2</sup>
$\phi' =$	11	o



Firmado electrónicamente por:  
MARCOS DARIO  
GONZALEZ MALDONADO

TUTOR: Ing. Marcos González

## LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

CÓDIGO

REVISIÓN No.  
FECHA REVISIÓN

### ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR

FECHA DE IMPRESIÓN	2025-02-25	No. ENSAYO	MATERIAL
FECHA DE ENSAYO	2024-11-19	816	Indeterminado

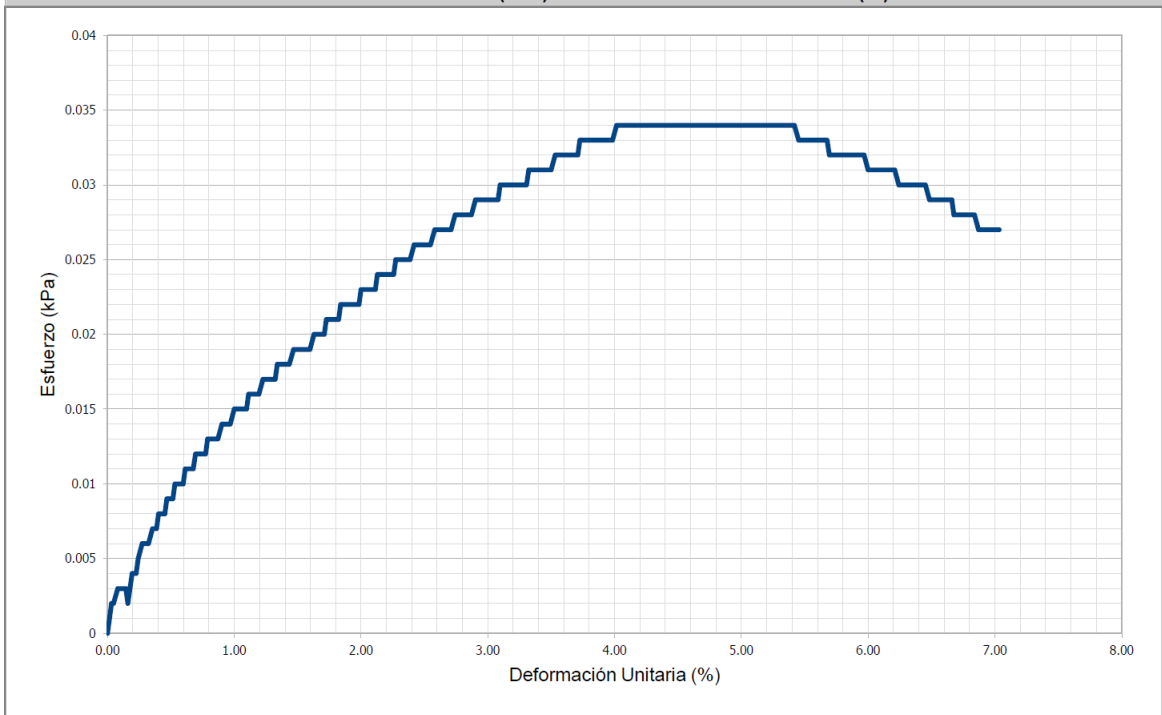
#### INFORMACIÓN GENERAL

ID. MUESTRA	CENTRO 1		
CLIENTE			
PROYECTO	Tesis de Pamela Pesántez		

#### ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO

Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)
<b>62</b>	<b>4.37</b>	<b>7.048</b>	<b>0</b>
Área (mm <sup>2</sup> )	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	
<b>3844</b>	<b>132.6</b>	<b>0.034</b>	

#### GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)



OBSERVACIONES:



El ensayo fue realizado electrónicamente por:  
**MARCOS DARIÓ GONZÁLEZ MALDONADO**

TUTOR

**Ing. Marcos González**

## LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

CÓDIGO

REVISIÓN No.  
FECHA REVISIÓN

### ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR

FECHA DE IMPRESIÓN	2025-02-25	No. ENSAYO	MATERIAL
FECHA DE ENSAYO	2024-11-19	818	Indeterminado

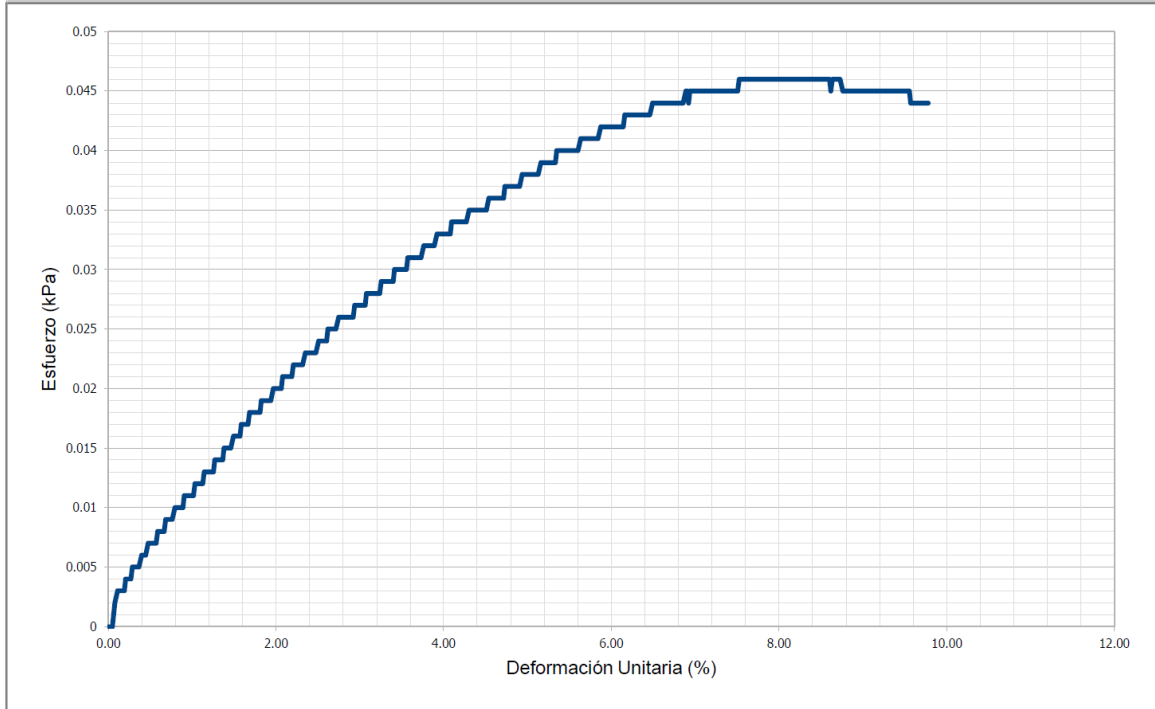
#### INFORMACIÓN GENERAL

ID. MUESTRA	CENTRO 2		
CLIENTE			
PROYECTO	Tesis de Pamela Pesántez		

#### ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO

Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)
<b>63</b>	<b>6.16</b>	<b>9.778</b>	<b>0</b>
Área (mm <sup>2</sup> )	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	
<b>3969</b>	<b>181.8</b>	<b>0.046</b>	

#### GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)



OBSERVACIONES:



Elaborado y validado por:  
MARCOS DARIO  
GONZALEZ MALDONADO

TUTOR

Ing. Marcos González

## LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

CÓDIGO

REVISIÓN No.  
FECHA REVISIÓN

### ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR

FECHA DE IMPRESIÓN	2025-02-25	No. ENSAYO	MATERIAL
FECHA DE ENSAYO	2024-11-19	819	Indeterminado

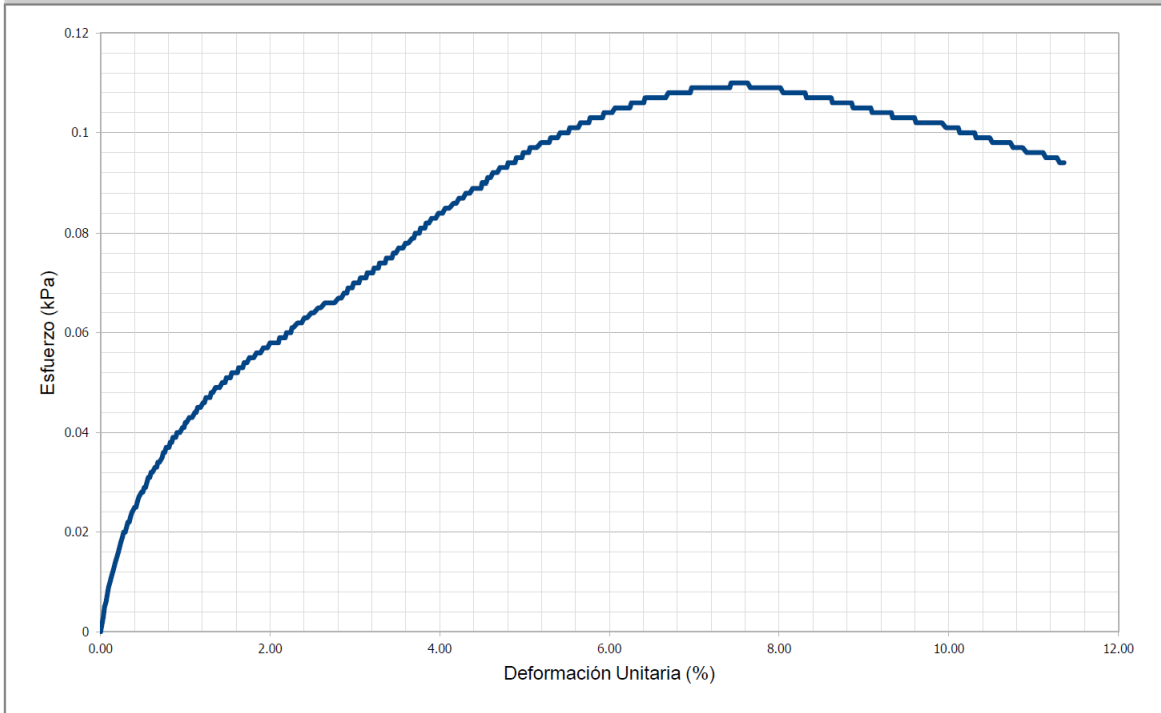
#### INFORMACIÓN GENERAL

ID. MUESTRA	CENTRO 3		
CLIENTE			
PROYECTO	Tesis de Pamela Pesántez		

#### ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO

Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)
<b>62</b>	<b>7.04</b>	<b>11.355</b>	<b>0</b>
Área (mm <sup>2</sup> )	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	
<b>3844</b>	<b>421.8</b>	<b>0.11</b>	

#### GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)



OBSERVACIONES:



MARCOS DARIO  
GONZALEZ MALDONADO

TUTOR

Ing. Marcos González

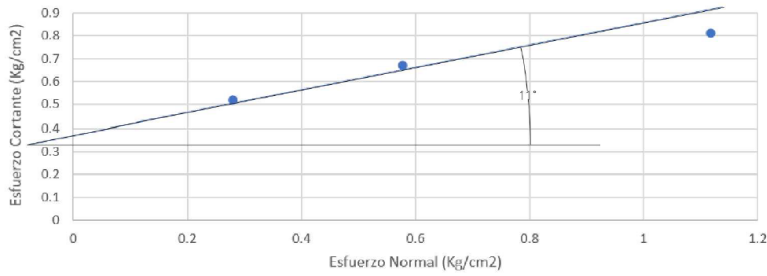
CORTE DIRECTO

PROYECTO:	Tesis Pamela Carolina Pesántez Cabrera
MUESTRA:	Centro
SOLICITADO POR :	
FECHA:	Noviembre 2024

DATOS	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3
Peso anillo (gr)	151.6	122.4	151.6
Lado anillo (cm)	6.2	6.3	6.2
Alto anillo (cm)	2.1	2.1	2.1
Volumen anillo (cm <sup>3</sup> )	80.724	83.349	80.724
Peso muestra húmeda + anillo (gr)	305.4	279.3	307
Peso muestra húmeda (gr)	153.8	156.9	155.4
Peso muestra seca (gr)	123.8	126.8	124.5
Humedad de la muestra (%)	24.23	23.74	24.82
Peso específico húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	1.91	1.88	1.93
Peso específico seco (gr/cm <sup>3</sup> )	1.53	1.52	1.54

Ensayo	Carga Normal (KG)	Lado prom (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	Lado corregido (cm)	Area corregida (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Normal (Kg/cm <sup>2</sup> )	Carga Cortante (N)	Carga Cortante (Kg)	Esf. Cortante (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	10	6.2	38.44	5.763	35.73	0.279872154	196.1	19.98980632	0.520026179
2	20	6.2	38.44	5.58	34.60	0.578101515	252.3	25.71865443	0.669059689
3	40	6.3	39.69	5.684	35.81	1.117031377	316.3	32.24260958	0.812361038

Envolvente de falla



Resultados		
c' =	0.34	kg/cm <sup>2</sup>
φ' =	11	o



Firmado electrónicamente por:  
**MARCOS DARIO GONZALEZ MALDONADO**

TUTOR: Ing. Marcos González

## LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

CÓDIGO

REVISIÓN No.  
FECHA REVISIÓN

### ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR

FECHA DE IMPRESIÓN	2025-02-25	No. ENSAYO	MATERIAL
FECHA DE ENSAYO	2024-11-19	811	Indeterminado

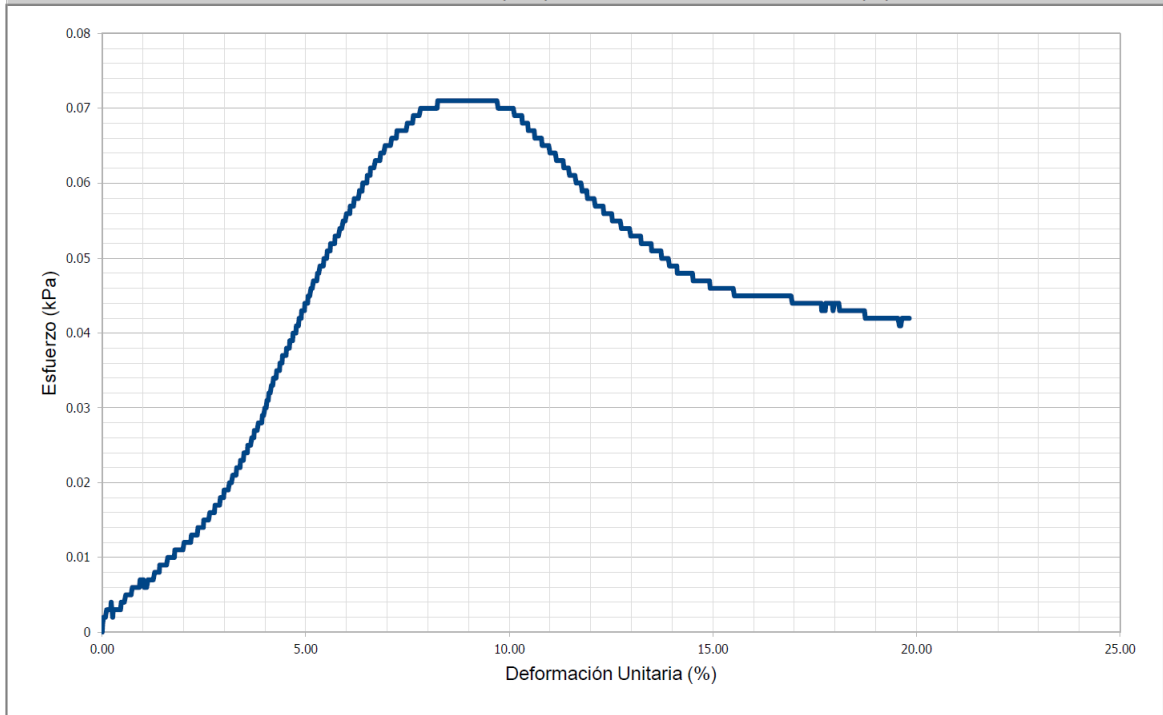
#### INFORMACIÓN GENERAL

ID. MUESTRA	ABAJO 1		
CLIENTE			
PROYECTO	Tesis de Pamela Pesántez		

#### ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO

Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)
62	12.29	19.823	0
Área (mm <sup>2</sup> )	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	
3844	274.2	0.071	

#### GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)



OBSERVACIONES:



Validado electrónicamente por:  
MARCOS DARIO GONZALEZ MALDONADO

TUTOR

Ing. Marcos González

## LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

CÓDIGO

REVISIÓN No.  
FECHA REVISIÓN

### ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR

FECHA DE IMPRESIÓN	2025-02-25	No. ENSAYO	MATERIAL
FECHA DE ENSAYO	2024-11-19	813	Indeterminado

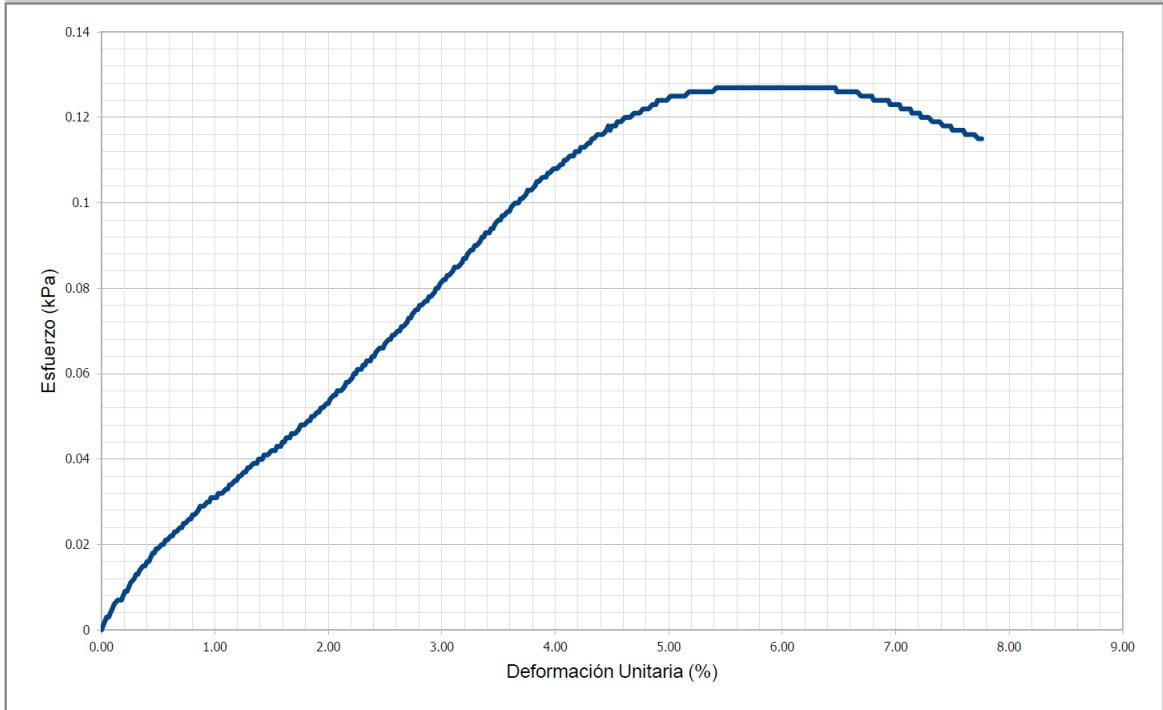
### INFORMACIÓN GENERAL

ID. MUESTRA	ABAJO 2
CLIENTE	
PROYECTO	Tesis de Pamela Pesántez

### ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO

Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)
<b>62</b>	<b>4.81</b>	<b>7.758</b>	<b>0</b>
Área (mm <sup>2</sup> )	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	
<b>3844</b>	<b>489.6</b>	<b>0.127</b>	

### GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)



OBSERVACIONES:



MARCOS DARIO  
GONZALEZ MALDONADO

TUTOR

Ing. Marcos González

## LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

CÓDIGO

REVISIÓN No.  
FECHA REVISIÓN

### ENSAYO DE CORTE DIRECTO - ANILLO RECTÁNGULAR

FECHA DE IMPRESIÓN	2025-02-25	No. ENSAYO	MATERIAL
FECHA DE ENSAYO	2024-11-19	814	Indeterminado

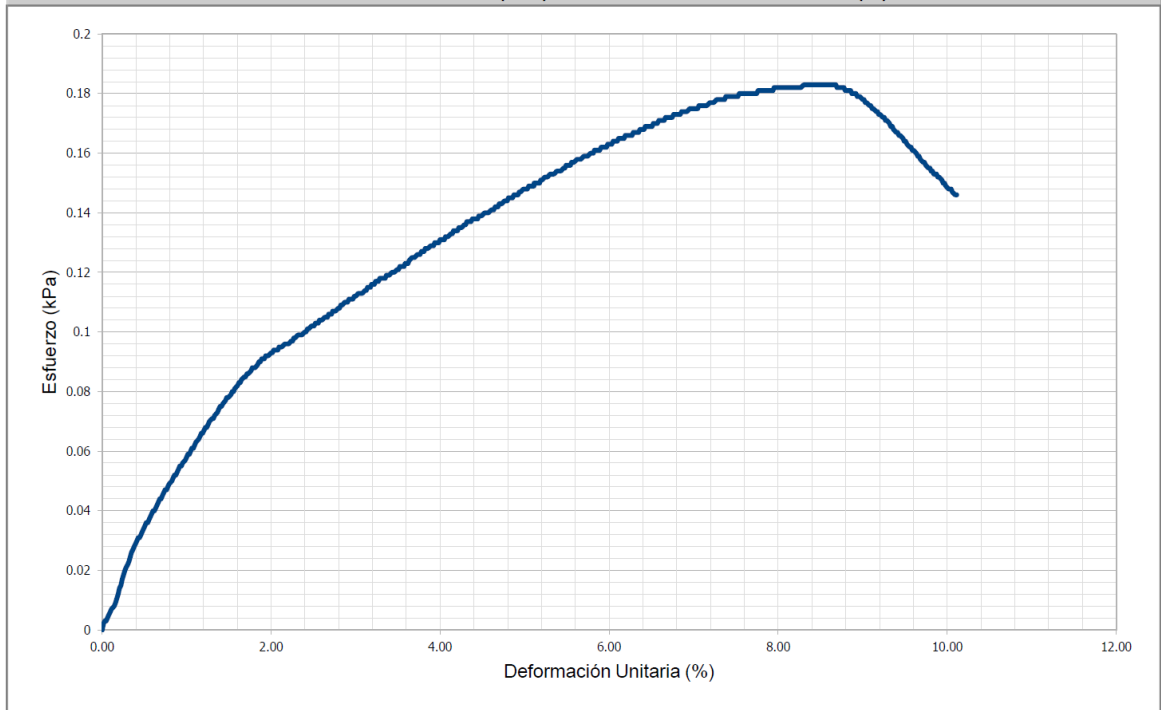
### INFORMACIÓN GENERAL

ID. MUESTRA	ABAJO 3		
CLIENTE			
PROYECTO	Tesis de Pamela Pesántez		

### ASPECTOS DIMENSIONALES DEL ENSAYO

Lado (mm)	Desplazamiento horizontal (mm)	Deformación unitaria (mm)	Deformación vertical (mm)
<b>63</b>	<b>6.37</b>	<b>10.111</b>	<b>0</b>
Área (mm <sup>2</sup> )	Fuerza máxima (N)	Esfuerzo máximo (kPa)	
<b>3969</b>	<b>725.8</b>	<b>0.183</b>	

### GRÁFICA ESFUERZO (kPa) vs. DEFORMACIÓN UNITARIA (%)



OBSERVACIONES:



Autenticado electrónicamente por:  
MARCOS DARIO GONZALEZ MALDONADO

TUTOR

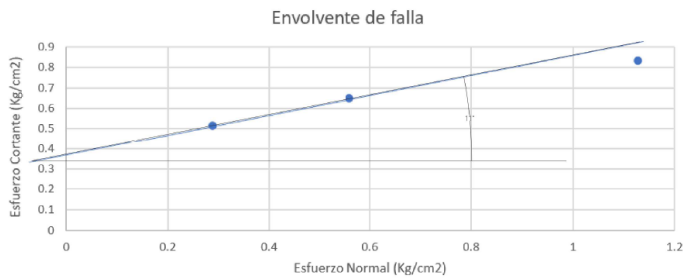
Ing. Marcos González

CORTE DIRECTO

PROYECTO:	Tesis Pamela Carolina Pesántez Cabrera
MUESTRA:	Abajo
SOLICITADO POR:	
FECHA:	Noviembre 2024

DATOS	ENSAYO 1	ENSAYO 2	ENSAYO 3
Peso anillo (gr)	151.6	151.6	122.4
Lado anillo (cm)	6.2	6.2	6.3
Alto anillo (cm)	2.1	2.1	2.1
Volumen anillo (cm <sup>3</sup> )	80.724	80.724	83.349
Peso muestra húmeda + anillo (gr)	282.7	284.4	258.1
Peso muestra húmeda (gr)	131.1	132.8	135.7
Peso muestra seca (gr)	103.5	111.9	109.1
Humedad de la muestra (%)	26.67	18.68	24.38
Peso específico húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	1.62	1.65	1.63
Peso específico seco (gr/cm <sup>3</sup> )	1.28	1.39	1.31

Ensayo	Carga Normal (KG)	Lado prom (cm)	Area (cm <sup>2</sup> )	Lado corregido (cm)	Area corregida (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Normal (Kg/cm <sup>2</sup> )	Carga Cortante (N)	Carga Cortante (Kg)	Esf. Cortante (Kg/cm <sup>2</sup> )
1	10	6.2	38.44	5.58	34.60	0.289050757	194.200	19.796	0.51498768
2	20	6.3	39.69	5.67	35.72	0.55989474	252.400	25.729	0.648245102
3	40	6.2	38.44	5.72	35.46	1.127904354	314.400	32.049	0.833739065



Resultados		
c' =	0.35	kg/cm <sup>2</sup>
φ' =	11	o



Firmado electrónicamente por:  
MARCOS DARIO  
GONZALEZ MALDONADO

TUTOR: Ing. Marcos González



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

**PERMEABILIDAD**

PROYECTO:	Tesis Pamela Carolina Pesántez Cabrera
MUESTRA:	Arriba
SOLICITADO POR :	
FECHA:	Diciembre 2024

Datos de laboratorio			
Longitud de la muestra	L	9.4	cm
Diámetro de la muestra	D	6.4	cm
Diámetro de la tubería	a	1.4	cm
Altura	H	7.2	cm
Área	A	32.17	cm <sup>2</sup>
Volumen	Vol.	231.62	cm <sup>3</sup>

Fórmula empleada:

$$k = \frac{\alpha L}{At} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Tiempo (t)		Altura		Área de la sección cm <sup>2</sup>	Coeficiente de cm/seg
min	seg	h1 cm	h2 cm		
	40	100	90	1.5394	9.07E-05
	80	100	80	1.5394	9.61E-05
	130	100	70	1.5394	9.45E-05
<b>PROMEDIO</b>					9.38E-05



Firmado electrónicamente por:  
**MARCOS DARIO GONZALEZ MALDONADO**

Tutor: Ing. Marcos González

**PERMEABILIDAD**

PROYECTO:	Tesis Pamela Carolina Pesántez Cabrera
MUESTRA:	Centro
SOLICITADO POR :	
FECHA:	Diciembre 2024

Datos de laboratorio			
Longitud de la muestra	L	9.4	cm
Diámetro de la muestra	D	6.4	cm
Diámetro de la tubería	a	1.4	cm
Altura	H	7.2	cm
Área	A	32.17	cm <sup>2</sup>
Volumen	Vol.	231.62	cm <sup>3</sup>

Fórmula empleada:

$$k = \frac{aL}{At} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Tiempo (t)		Altura		Área de la sección cm <sup>2</sup>	Coeficiente de cm/seg
min	seg	h1 cm	h2 cm		
	40	100	90	1.5394	3.74E-05
	80	100	80	1.5394	3.34E-05
	130	100	70	1.5394	3.00E-05
<b>PROMEDIO</b>					3.36E-05



Elaborado y autorizado por:  
MARCOS DARIO  
GONZALEZ MALDONADO

Tutor: Ing. Marcos González

**PERMEABILIDAD**

PROYECTO:	Tesis Pamela Carolina Pesántez Cabrera
MUESTRA:	Abajo
SOLICITADO POR :	
FECHA:	Diciembre 2024

Datos de laboratorio			
Longitud de la muestra	L	5.5	cm
Diámetro de la muestra	D	6.4	cm
Diámetro de la tubería	a	1.4	cm
Altura	H	5.5	cm
Área	A	32.17	cm <sup>2</sup>
Volumen	Vol.	176.93	cm <sup>3</sup>

Fórmula empleada:

$$k = \frac{\alpha L}{At} \ln \frac{h_1}{h_2}$$

Tiempo (t)		Altura		Área de la sección cm <sup>2</sup>	Coeficiente de cm/seg
min	seg	h1 cm	h2 cm		
	40	100	90	1.5394	8.67E-05
	80	100	80	1.5394	8.39E-05
	130	100	70	1.5394	7.82E-05
<b>PROMEDIO</b>					8.29E-05



Firmado electrónicamente por:  
MARCOS DARIO  
GONZALEZ MALDONADO

Tutor: Ing. Marcos González

## **AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL**

Yo, Pamela Carolina Pesántez Cabrera portadora de la cédula de ciudadanía N.º 010498873-8. En calidad de autora y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación: “MONITOREO Y EVALUACIÓN DEL DESLIZAMIENTO EN EL SECTOR REINA DEL CISNE: MEDIANTE TELEDETECCIÓN Y GEOTECNIA”, de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 31 de marzo de 2025



F: .....

Pamela Carolina Pesántez Cabrera

010498873-8