

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Análisis de la susceptibilidad a deslizamiento en la parte baja de la
conducción Labrado – Tuñi

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingenieros
Civiles

Autores:

Josué Anthony Naspud Herrera

Flabio Jhojan Velez Parra

Director:

Karla Johanna Santacruz Reyes

ORCID:  0009-0000-8192-7948

Cuenca, Ecuador

2024-09-23

Resumen

El presente estudio se enfoca en analizar la susceptibilidad a movimientos de masa en la parte baja de la conducción Labrado – Tuñi, administrada por Elecausto S.A.; sector que ha sufrido de fenómenos de inestabilidad, afectando el canal de conducción de agua que se encuentra en la zona.

El objetivo general del presente trabajo es evaluar la susceptibilidad a movimientos de masa en la zona de estudio y analizar posibles procesos de mitigación. Para alcanzar este objetivo, se desarrolló una metodología que incluye la recolección de datos, caracterización del suelo, análisis de movimientos de masa, mapeo de susceptibilidad y propuestas de medidas de mitigación.

Los resultados del mapa de susceptibilidad indican que la zona de estudio presenta una susceptibilidad a movimientos de masa predominantemente baja a moderada. Sin embargo, se identificaron áreas específicas con una alta susceptibilidad a estos movimientos. En estas zonas críticas, se evaluaron diversas técnicas de mitigación, tales como la hidrosiembra con vegetación nativa, la plantación de barreras vegetales y el uso de geoceldas. Estas soluciones tienen como objetivo mejorar la estabilidad del terreno y minimizar los riesgos asociados a los movimientos de masa.

Palabras clave del autor: inestabilidad, movimientos de masa, canal de conducción, geoceldas, vegetación nativa.



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

This study focuses on analyzing the susceptibility to mass movements in the lower part of the Labrado–Tuñi channel, managed by Elecausto S.A., a sector that has experienced instability phenomena affecting the water conduction channel located in the area.

The general objective of this work is to evaluate the susceptibility to mass movements in the study area and analyze possible mitigation processes. To achieve this objective, a methodology was developed that includes data collection, soil characterization, mass movement analysis, susceptibility mapping, and proposals for mitigation measures.

The results of the susceptibility map indicate that the study area has predominantly low to moderate susceptibility to mass movements. However, specific areas with high susceptibility to these movements were identified. In these critical areas, various mitigation techniques were evaluated, such as hydroseeding with native vegetation, planting vegetative barriers, and using geocells. These solutions aim to improve the stability of the terrain and minimize the risks associated with mass movements.

Author keywords: *instability, mass movements, conduction channel, geocells, native vegetation.*



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Tabla de contenido

1. Problema de estudio	13
1.1. Introducción	13
1.2. Antecedentes	13
1.3. Descripción del problema	13
1.4. Ubicación	14
1.5. Justificación	15
2. Objetivos	15
2.1. Objetivo General	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. Marco teórico	15
3.1. Talud	15
3.1.1. Taludes Construidos	15
3.1.2. Taludes Naturales	16
3.2. Clasificación taxonómica de los suelos	16
3.2.1. Alfisoles	16
3.2.2. Andisoles	16
3.2.3. Entisoles	17
3.2.4. Inceptisoles	17
3.3. Tipos de movimientos de suelo	17
3.3.1. Deslizamiento	17
3.3.2. Flujo	17
3.3.3. Tipos de deslizamientos y flujos	17
3.4. Unidades geológicas	19
3.4.1. Formación Célica	19
3.4.2. Formación Tarqui	19
3.4.3. Depósitos aluviales recientes	19
3.5. Caracterización de materiales	19
3.5.1. Caracterización del suelo	20
3.5.2. Caracterización de las rocas	20
3.5.3. Caracterización del suelo según resistividad eléctrica	21
3.6. Tomografía eléctrica	23
3.6.1. Procesamiento de datos	24
3.6.2. Arreglo de electrodos: Dipolo – Dipolo	24
3.7. Curvas IDF	25

3.8. Sistema de Información Geográfica (SIG)	25
3.9. Método semiautomático para delimitación de cuencas	25
3.9.1. Modelo digital de elevación	25
3.9.2. Dirección de flujo	26
3.9.3. Acumulación de flujo	27
3.9.4. Enlaces de transmisión (Stream Links)	27
3.9.5. Watershed (área de captación)	28
3.10. Método Mora & Varhson	28
3.10.1. Parámetro de pendiente (SP)	31
3.10.2. Parámetro de susceptibilidad litológica (SL)	32
3.10.3. Parámetro de humedad (SH)	33
3.10.4. Parámetro de cobertura vegetal (SC)	34
3.10.5. Parámetro de disparo por lluvia (D_{LL})	35
3.10.6. Parámetro de disparo por sismicidad (D_S)	36
3.10.7. Índice de susceptibilidad	36
3.11. Estrategias de mitigación de movimiento de masas	37
3.11.1. Hidrosiembra	37
3.11.2. Revestimiento de hormigón lanzado	37
3.11.3. Plantación vegetal en barrera	37
3.11.4. Muro de pie de talud	38
3.11.4.1. Muro de tierra armada	38
3.11.5. Escalonamiento del terreno	38
3.11.6. Mallas o redes orgánicas	38
3.11.7. Geoceldas	38
3.11.8. Drenajes	39
4. Metodología	39
4.1. Recolección de información	39
4.2. Exploración y caracterización	40
4.2.1. Identificación de puntos de análisis	40
4.2.2. Muestras para ensayos de granulometría y límites de Atterberg	40
4.2.3. Granulometría	41
4.2.4. Límites de Atterberg:	43
4.2.4.1. Procedimiento límite líquido:	43
4.2.5. Procedimiento límite plástico:	43
4.2.6. Resistividad eléctrica	44

4.3. Evaluación de movimientos de masa	45
4.4. Generación de mapas	45
4.4.1. Delimitación de la microcuenca	45
4.4.2. Determinación de amenaza por deslizamiento	47
4.5. Propuesta de planes de mitigación	50
5. Resultados y discusión	50
5.1. Recolección de información	50
5.1.1. Geología	50
5.1.2. Precipitaciones	52
5.2. Identificación de movimientos de masa	54
5.3. Puntos para la caracterización del suelo	55
5.3.1. Puntos para ensayos de laboratorio	56
5.3.2. Puntos para resistividad eléctrica	57
5.4. Caracterización del suelo	58
5.4.1. Ensayos de laboratorio	58
5.5. Evaluación de movimientos de masa	62
5.5.1. Evaluación para la zona de la quebrada Q1, zona del movimiento de masa 1	
62	
5.5.2. Para el movimiento de masa 2	66
5.6. Delimitación de las microcuenca	67
5.7. Análisis de los mapas de los factores utilizados en el método Mora & Varhson	67
5.7.1. Mapa del factor de pendiente	67
5.7.2. Mapa del factor litológico	68
5.7.3. Mapa del factor de humedad	70
5.7.4. Mapa del factor de cobertura vegetal	71
5.7.5. Mapa del factor de precipitación	72
5.7.6. Mapa del factor de sismicidad	72
5.8. Mapa de susceptibilidad	73
5.9. Propuestas de mitigación y prevención	75
5.9.1. Propuestas para los movimientos de masa en la zona de la quebrada Q1:	75
5.9.2. Propuestas para la zona de la quebrada Q2	76
6. Conclusiones	76
Referencias	79
Anexos	83

Índice de figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del sitio de intervención. Fuente: Elaboración propia.....	14
Figura 2. Parte baja de la conducción Labrado-Tuñi. Fuente: Modificado de Google Earth.	14
Figura 3. Principio de medición geo eléctrica. Fuente: modificado de (Knödel, Krummel, & Lange, 2005)	23
Figura 4. Configuración de electrodos Dipolo- Dipolo. Fuente: Modificado de (Díaz E. , 2010)	24
Figura 5 Valores de las distancias para cada dirección del centro de las celdas. Fuente: Modificado de (Rosa Ruiz, 2008)	26
Figura 6 Demostración de un cambio de un DEM a una matriz de dirección de flujo. Fuente: (Rosa Ruiz, 2008)	26
Figura 7 Demostración de un cambio de la matriz de dirección de flujo a una matriz de flujo acumulado. Fuente: (Rosa Ruiz, 2008)	27
Figura 8 Demostración de los enlaces e intersecciones que se forman en una red de drenaje. Fuente: Modificado de (Rosa Ruiz, 2008)	28
Figura 9 Formación de los watershed en programa SIG. Fuente: (Rosa Ruiz, 2008)	28
Figura 10. Resistivímetro usado para el estudio. Fuente: Elaboración propia	44
Figura 11 Proceso para la delimitación de las microcuenca en la parte baja de la conducción Labrado – Tuñi. Fuente: Elaboración propia	47
Figura 12 Mapa sísmico de Ecuador. Fuente: modificado de (NEC-SE-DS, 2015)	49
Figura 13 Roca Toba cristalina identificada en la parte baja de la conducción Labrado - Tuñi. Fuente: Modificado de Google Earth	50
Figura 14 Material coluvial identificado en una de las quebradas a lo largo de la vía Labrado – Tuñi. Fuente: Modificado de Google Earth	51
Figura 15 Material coluvial identificado en la parte baja de la conducción de Labrado – Tuñi. Fuente: Modificado de Google Earth	51
Figura 16 Roca andesita identificada en la parte baja de la conducción de Labrado – Tuñi. Fuente: Modificado de Google Earth	52
Figura 17. Basalto identificado en la parte baja de la conducción de Labrado – Tuñi. Fuente: Modificado de Google Earth	52
Figura 18 Precipitaciones diarias en la zona de estudio de la estación Chanlud. Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por el PROMAS de la Universidad de Cuenca	53
Figura 19 Precipitaciones diarias en la zona de estudio de la estación El Labrado. Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por ETAPA	53
Figura 20. Movimiento de masa 1 observado por medio de un dron, en la zona de una quebrada. Fuente: Elaboración propia	54
Figura 21. Movimiento de masa 2 observado mediante visitas de campo. Fuente: Elaboración propia	55
Figura 22 Movimiento de masa 3 observado mediante visitas de campo. Fuente: Elaboración propia	55
Figura 23. Puntos de muestro. Fuente: Modificado de Google Earth.	57
Figura 24. Tramo en la zona de la quebrada Q1, para el estudio de resistividad eléctrica. Fuente: Modificado de Google Earth.	57
Figura 25.Tramo en la zona de la quebrada Q2, para el estudio de resistividad eléctrica. Fuente: Modificado de Google Earth.	58

Figura 26. Resultado de la tomografía eléctrica por inversión en la zona de la quebrada Q1. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 27.Resultado de la tomografía eléctrica por inversión en la zona de la quebrada Q2. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 28. Perfil estratigráfico del talud de la zona de la quebrada Q1, en la zona media del talud. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 29. Perfil estratigráfico del talud de la zona de la quebrada Q2, en la zona media del talud. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 30. Delimitación del área para ortofotos de la zona de la quebrada Q1, donde se ve el movimiento de masa 1. Fuente: Modificado de Google Earth.....	62
Figura 31. Diferenciación de quebrada (color azul), movimiento de masa 1 (color rojo) y vía de la zona de estudio (color amarillo). Fuente: Modificado de Google Earth.....	63
Figura 32. Material acarreado presente aguas arriba de la quebrada Q1. Fuente: Elaboración propia.....	63
Figura 33.Diferenciación de tipos de material en la zona de la quebrada Q1. Fuente: Elaboración propia	64
Figura 34. Ortofoto año 2015 movimiento de masa 1. Fuente: Modificado de Google Earth	65
Figura 35. Ortofoto año 2017 movimiento de masa 1. Fuente: Modificado de Google Earth	65
Figura 36. Ortofoto año 2022 movimiento de masa 1. Fuente: Modificado de Google Earth	65
Figura 37. Ortofoto año 2024 movimiento de masa 1. Fuente: Modificado de Google Earth	66
Figura 38. Estado del movimiento de masa 2 en el año 2022. Fuente: Modificado de Google Earth	66
Figura 39. Estado del movimiento de masa 2 en el año 2023. Fuente: Modificado de Google Earth.....	67
Figura 40 Ubicación de las microcuenca y las quebradas a las que pertenecen. Fuente: Modificado de Google Earth	67
Figura 41. Mapa del factor de pendientes. Fuente: Elaboración propia a partir de la información topográfica de Elecausto	68
Figura 42 Mapa del factor litológico en el software ArcGIS. Fuente: Elaboración propia a partir de la información geológica de Cuenca	70
Figura 43 Mapa del factor de cobertura vegetal generado en el software ArcGIS. Fuente: Elaboración propia con información del Ministerio de Agricultura y Ganadería.....	72
Figura 44 Histograma del índice de susceptibilidad de la zona estudiada: Fuente: Elaboración propia	73
Figura 45 Mapa de susceptibilidad por el método Mora & Varhson de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia	74

Índice de tablas

Tabla 1. Georreferenciación de los puntos para la delimitación de la zona de estudio	15
Tabla 2. Resumen de algunos tipos de movimiento de masa.....	17
Tabla 3 Clasificación de roca según su resistencia a compresión.	21
Tabla 4. Valores comunes de resistividad asociados a diferentes materiales	22
Tabla 5. Clasificación del suelo y resistividad eléctrica.	22
Tabla 6 Clasificación y caracterización de la susceptibilidad al deslizamiento	31
Tabla 7 Valoración del parámetro S_P	32
Tabla 8 Clasificación de las diferentes litologías y su grado de susceptibilidad.....	33
Tabla 9 Clasificación de los pesos asignados a la humedad promedio mensual.....	34
Tabla 10 Valoración del parámetro de humedad S_H	34
Tabla 11 Valoración del factor de cobertura del suelo SC	35
Tabla 12 Valores para el parámetro de disparo por lluvia	36
Tabla 13 Valores para el parámetro de disparo por sismicidad	36
Tabla 14 Grado de amenaza de acuerdo al potencial de susceptibilidad	37
Tabla 15. Juego de tamices para granulometría gruesos.	41
Tabla 16. Juego de tamices para granulometría finos.	42
Tabla 17. Tamaño mínimo de la muestra.	42
Tabla 18 Nombre, código y ubicación de las estaciones meteorológicas empleadas en el estudio	48
Tabla 19 Datos de la evapotranspiración potencial en la zona de Labrado	48
Tabla 20 Estación El Labrado y sus precipitaciones promedio mensuales, desde el año 1985 hasta el año 2015. Meses desde enero a junio.	53
Tabla 21. Estación El Labrado y sus las precipitaciones promedio mensuales, desde el año 1985 hasta el año 2015. Meses desde julio hasta diciembre.	53
Tabla 22. Ubicación de los movimientos de masa identificados en la parte baja de la conducción Labrado - Tuñi	54
Tabla 23 Resumen de información de muestras para los ensayos de laboratorio.	56
Tabla 24. Puntos de referencia para resistividad eléctrica.	57
Tabla 25. Resultados del ensayo de humedad, de las muestras estudiadas.	58
Tabla 26. Humedad promedio de las muestras estudiadas.	59
Tabla 27. Tamaño de muestra utilizados para el ensayo de granulometría.	59
Tabla 28. Resumen de resultados de granulometría y límites de Atterberg.	59
Tabla 29. Distribución de los valores del factor pendiente en la zona de estudio	68
Tabla 30. Distribución del factor litológico de acuerdo a la geología de la zona	69
Tabla 31 Valores de S_L obtenidos para los movimientos de masa	69
Tabla 32 Valores de humedad obtenidos de manera indirecta de la zona de estudio	70
Tabla 33 Valores de humedad obtenidos con información de la estación de El Labrado	71
Tabla 34 Distribución y densidad de la cobertura y uso del suelo que se encuentra dentro de la zona de estudio	71
Tabla 35 Nueva valoración de la clasificación de la susceptibilidad	73
Tabla 36 Distribución y densidad de los rangos de susceptibilidad en la zona de estudio ...	74

Agradecimientos

Nosotros, los autores, queremos expresar nuestro más profundo agradecimiento a Dios. Extendemos nuestro sincero agradecimiento a nuestras familias y amigos por su amor incondicional, paciencia y apoyo inquebrantable durante todo este proceso. Su comprensión y ánimo fueron fundamentales para la realización de este trabajo.

Asimismo, agradecemos a la ingeniera Karla Santa Cruz, directora de esta tesis, por su invaluable guía, apoyo constante y sabios consejos durante toda la investigación. Extendemos nuestra gratitud a la empresa Elecausto, sede Cuenca, por proporcionar los recursos necesarios y el acceso a las instalaciones para la realización de este estudio.

Reconocemos especialmente la colaboración de la Red Sísmica de la Universidad de Cuenca y del departamento del PROMAS de la misma universidad, no solo por la valiosa información y datos suministrados, sino también por el préstamo de equipos esenciales para nuestro estudio. Agradecemos al Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca por el apoyo técnico y los recursos materiales que contribuyeron a la culminación de esta investigación.

Queremos expresar nuestra gratitud a ETAPA por proporcionarnos información importante que fue crucial para la realización de esta tesis.

Además, extendemos nuestros agradecimientos a los ingenieros Diana Mora, Esteban Pacheco y Oscar Morales por su invaluable ayuda y apoyo en la realización de esta tesis. Su colaboración y conocimientos fueron determinantes para el desarrollo y éxito de nuestro trabajo.

Atentamente,

Josué Naspud

Flabio Velez

Dedicatoria

A Dios, por darme la fuerza y la sabiduría para superar cada desafío. A mi madre, por su amor incondicional y su apoyo constante; a mi familia, por su paciencia, comprensión y por creer en mí incluso en los momentos más difíciles; a mis amigos, por estar siempre a mi lado, brindándome su amistad y motivación, y por hacer de estos años una experiencia inolvidable; a mis compañeros de universidad, por compartir conmigo este viaje de aprendizaje y crecimiento, superando retos y celebrando éxitos juntos; y a mis profesores, por su dedicación y sabiduría, impartiendo sus conocimientos con pasión y motivándome a ser mejor cada día. Gracias a todos ustedes, he podido alcanzar este logro.

Josué Naspid

Dedicatoria

A mi amada madre Magali, y a mis queridas abuelas Raquel y Miriam, cuyas raíces me sostienen y su amor ilumina mi camino.

Flabio Velez

1. Problema de estudio

1.1. Introducción

Dentro del extenso campo de la Ingeniería Civil, la geotecnia se define como una disciplina fundamental que se dedica al análisis de las propiedades mecánicas, físicas y químicas del suelo. Su principal objetivo es investigar el comportamiento de los suelos y las rocas en relación con las estructuras construidas sobre ellos. En el ámbito de la estabilidad del terreno, no solo implica la evaluación de la estabilidad, sino también la implementación de medidas preventivas para mitigar posibles riesgos geotécnicos que podrían tener un impacto negativo en las construcciones (Braja, 2015).

La Geotecnia desempeña un papel crucial en la planificación y desarrollo de iniciativas de Ingeniería Civil. A través del análisis de las propiedades del suelo y su relación con las estructuras, este campo de estudio persigue la comprensión de los elementos que inciden en la estabilidad del terreno. Este enfoque no sólo contribuye a optimizar la eficacia de los proyectos, sino que también garantiza la prevención a largo plazo de posibles riesgos geotécnicos, como los movimientos de masa, lo que a su vez asegura la solidez y perdurabilidad de las edificaciones. (Coduto, 1999).

En lo que respecta a los movimientos de masa en taludes, a lo largo de varias décadas, investigadores de distintas naciones han analizado los factores desencadenantes y las técnicas de evaluación empleadas. Este esfuerzo ha mejorado la comprensión del comportamiento de los suelos en diferentes condiciones de humedad y ha promovido el desarrollo de herramientas computacionales para su análisis (Gerscovich, 2012).

Sin embargo, los movimientos de masas de taludes continúan generando problemas, especialmente en regiones montañosas, hasta el punto de convertirse en una preocupación gubernamental debido a su impacto en la seguridad pública.

1.2. Antecedentes

La administración integral del complejo hidroeléctrico Machángara, gestionado por la Empresa Electro Generadora del Austro (ELECAUSTRO S.A), incluye la supervisión y operación de las centrales de generación Saymirín y Saucay. El acceso a estas instalaciones, que incluye elementos cruciales como la represa de Labrado y sus canales de conducción, se realiza a través de la vía Labrado-Tuñi. El canal de conducción Labrado-Tuñi transporta agua desde la presa El Labrado hasta el reservorio Tuñi, siendo esencial para el suministro de agua a la central hidroeléctrica Saucay. La operación eficiente del canal Labrado-Tuñi es crucial para la generación de energía hidroeléctrica en la región.

1.3. Descripción del problema

El canal rectangular de Labrado-Tuñi enfrenta un desafío debido a los movimientos de masa de los taludes en su entorno. Estos movimientos no solo ponen en riesgo la integridad del canal, sino que también pueden obstruir el flujo de agua, afectando su funcionalidad y la seguridad de la vía. La evaluación y mitigación de estos movimientos de masa son importantes para mantener la operatividad del canal.

1.4. Ubicación

El área de interés se encuentra en la provincia del Azuay, al sur de la República del Ecuador, aproximadamente a 20 kilómetros de la ciudad de Cuenca, ubicada en la región austral del país. El área de estudio se sitúa entre las parroquias de Checa y Chiquintad, como se muestra en la Figura 1. Se trata de un área montañosa caracterizada por ser poco habitada.

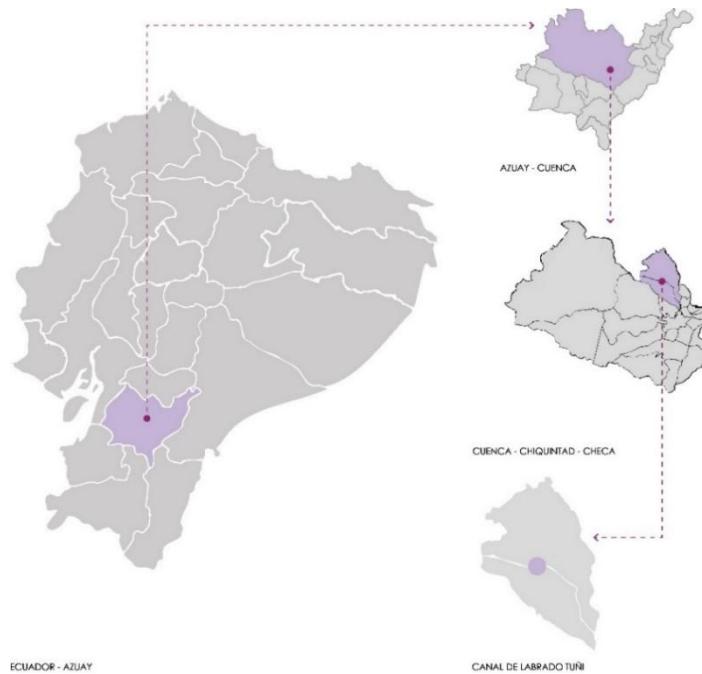


Figura 1. Ubicación geográfica del sitio de intervención. Fuente: Elaboración propia.

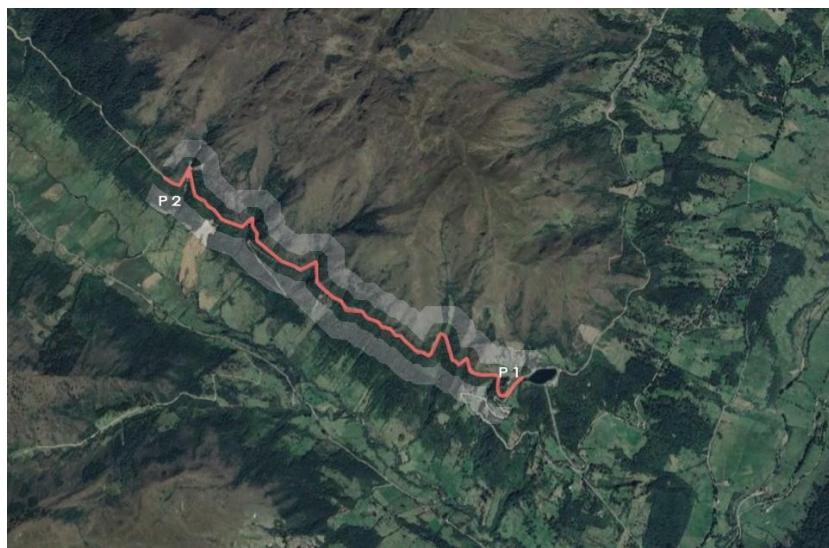


Figura 2. Parte baja de la conducción Labrado-Tuñí. Fuente: Modificado de Google Earth

El estudio se centró en la parte baja de la conducción Labrado – Tuñí, en las áreas de influencia sobre el recorrido de esta conducción. La vía tiene un recorrido de 3.5 kilómetros como se muestra en la línea roja de la Figura 2, desde el punto P1 (abscisa +0.00 km),

hasta el punto P2 (abscisa +3.50 km), en la Tabla 1 se puede observar la ubicación de los puntos para la delimitación de la zona de estudio.

Tabla 1. Georreferenciación de los puntos para la delimitación de la zona de estudio

Punto	Ubicación UTM WGS84 Zona 17M	
	E	N
P1	710098.605 m	9696385.970 m
P2	718330.143 m	9697378.074 m

Fuente: Elaboración propia.

1.5. Justificación

La presente investigación se basa en la importancia de gestionar los riesgos asociados con los movimientos de masa en taludes. Al identificar estos movimientos y los parámetros que influyen en su susceptibilidad, se busca mejorar la seguridad operativa de las infraestructuras afectadas por estos movimientos de masa. El análisis y mitigación de estos riesgos contribuye a la protección de las infraestructuras y a la mejora de la gestión de riesgos en ingeniería civil.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

- Analizar la susceptibilidad a movimientos de masa en la zona baja de la conducción Labrado – Tuñi.

2.2. Objetivos Específicos

- Recabar y analizar las características geotécnicas, geológicas, topográficas e hidrológicas en la zona baja de la conducción Labrado-Tuñi.
- Realizar una caracterización del terreno en las áreas propensas a inestabilidades.
- Establecer los parámetros principales que causan la inestabilidad en taludes de la zona de estudio.
- Proponer estrategias de mitigación, con el objetivo de prevenir la inestabilidad en el terreno.

3. Marco teórico

3.1. Talud

Según Gerscovich (2012), el término "talud" describe cualquier superficie inclinada formada por suelo o roca. Estas superficies pueden originarse de manera natural o pueden ser creadas artificialmente por el ser humano.

Para diferenciar el tipo de taludes Gerscovich (2012), realiza la siguiente clasificación:

3.1.1. Taludes Construidos

Los taludes artificiales son elementos estructurales creados a través de la intervención humana, surgiendo de la realización de cortes en pendientes naturales, excavaciones de

diversa índole y la construcción de terraplenes. Estas estructuras son frecuentes en obras de infraestructura tales como carreteras, ferrocarriles y proyectos de urbanización.

3.1.2. Taludes Naturales

Los taludes naturales, también conocidos como laderas, son superficies inclinadas del terreno formadas por procesos geológicos y erosivos con el trascurso del tiempo, sin intervención humana. Están compuestos por suelo residual, coluviones o roca según se definen a continuación:

3.1.2.1. Suelo Residual

El suelo residual se forma mediante el proceso de meteorización de la roca madre. Este tipo de suelo permanece en su lugar de formación original, conservando una conexión directa con la roca de la cual se deriva. La meteorización química altera la composición mineralógica de la roca, mientras que la meteorización física descompone la roca en fragmentos más pequeños sin cambiar su composición química.

3.1.2.2. Suelo Coluvial

El suelo coluvial, denominado también coluvión, es un tipo de material heterogéneo compuesto por fragmentos de roca en diversos grados de meteorización, los cuales se encuentran dispersos en una matriz de suelo de menor tamaño de partículas. Este tipo de depósitos son generalmente transportados por la acción de la gravedad y suelen encontrarse típicamente en la parte inferior de pendientes o en áreas deprimidas donde se ha acumulado dicho material.

3.2. Clasificación taxonómica de los suelos

La categorización de los suelos de acuerdo con su taxonomía se fundamenta en las propiedades morfológicas, físicas, químicas y biológicas que poseen, las cuales posibilitan su distinción de manera sistemática. Dichas características abarcan aspectos como color, la estructura, la textura, la capacidad de retención de agua, la composición química, la permeabilidad y la presencia de horizontes que los diferencian en el perfil del suelo (FAO, 2009).

Entre esta clasificación se tienen algunos tipos entre ellos:

3.2.1. Alfisoles

Son suelos minerales que presentan un adecuado desarrollo en el proceso de formación del suelo se distinguen por la presencia de un horizonte superficial bien definido, situado sobre un horizonte con alto contenido de arcilla, resultado de la translocación de este material (Organization of American States, 1973).

3.2.2. Andisoles

Suelos de tonalidad oscura, originados a partir de depósitos volcánicos, presentan una elevada concentración de arcillas amorfas, complejos de humus-aluminio, y una densidad aparente que no supera los 0.9 g / cm³ (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2008).

3.2.3. Entisoles

Son los suelos menos evolucionados, por lo general, no presentan indicios de horizontes edafogenéticos y suelen localizarse en terrenos con pendientes pronunciadas, zonas propensas a inundaciones y cauces de barrancos con depósitos aluviales (Ministerio de Agricultura y Ganadería, 2008).

3.2.4. Inceptisoles

Estos suelos presentan un grado de desarrollo ligeramente superior al de los Entisoles, debido a que manifiestan desarrollo de horizontes, en estos suelos se tienen procesos de translocación de material o meteorización alta (Organization of American States, 1973).

3.3. Tipos de movimientos de suelo

Los movimientos de suelo son procesos geológicos y geomorfológicos en los cuales extensas masas de tierra se mueven debido a la influencia de la gravedad. Estos movimientos pueden manifestarse a distintas velocidades e involucran cambios en la cantidad de material movido y la distancia recorrida (Gerscovich, 2012). A continuación, se describen los principales tipos de movimientos de suelo:

3.3.1. Deslizamiento

Los deslizamientos de tierra son movimientos rápidos de masas de suelo o roca, donde es fácil notar una superficie de rotura. Estos eventos ocurren cuando las fuerzas de corte que actúan sobre el material igualan o superan su resistencia al corte (Gerscovich, 2012). En términos simples, el material se desplaza bruscamente a lo largo de la ruta de menor resistencia cuando las tensiones superan las fuerzas que lo sostienen.

En suelos y rocas, la ruptura se produce a lo largo de la superficie de menor resistencia al movimiento, influenciada por factores como la composición del material, la saturación de agua, la pendiente del terreno y cargas adicionales (Gerscovich, 2012).

3.3.2. Flujo

Los flujos en movimiento de masas ocurren cuando las partículas dentro de una masa se deslizan entre sí mientras avanzan sobre una superficie. Este tipo de movimiento implica deformaciones internas significativas y muestra características similares a las de un comportamiento fluido (Suarez, 2009).

3.3.3. Tipos de deslizamientos y flujos

Los tipos de movimientos de masa se pueden diferenciar por sus características y el tipo de material con el que se relaciona como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Resumen de algunos tipos de movimiento de masa.

Tipo de Movimiento	Descripción	Características	Tipo de
--------------------	-------------	-----------------	---------

			Material
Deslizamiento Rotacional	Movimiento circular que se produce hacia arriba de una superficie curvada.	Superficie de falla cóncava, que produce áreas de hundimiento y deslizamiento	Roca, Residuos, Tierra
Deslizamiento Traslacional	Movimiento a lo largo de una superficie casi plana que no presenta una rotación significativa.	Superficie de falla con forma plana. Puede transformarse en flujo con pendientes pronunciadas, movimientos rápidos.	Residuos, Tierra
Deslizamiento de Bloque	Movimiento a lo largo de discontinuidades en roca.	Cuando ocurre a lo largo de dos discontinuidades se denomina deslizamiento de cuña, mientras que cuando ocurre entre múltiples discontinuidades se llama falla en escalera.	Roca
Flujo de Bloques de Roca	Movimiento de fragmentos de roca posiblemente con inclusiones de material fino, frecuente en áreas con pendientes pronunciadas.	Pendientes mayores a 45°. Frecuente en rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, y puede ocurrir antes de otros tipos de movimientos.	Roca
Flujo de Detritos	Movimiento rápido de una mezcla de sólidos y líquidos, moviéndose como ondas a lo largo de un canal.	Incremento de velocidad durante el descenso, con la capacidad de arrastrar materiales de diversos tamaños.	Residuos, Lodo
Flujo de Suelo	Movimiento de materiales finos con consistencia líquida.	Comienza como deslizamiento, ya sea rotacional o traslacional, y su velocidad depende de factores como la humedad del suelo y la pendiente del terreno.	Tierra, Lodo

Fuente: Modificado de (Suarez, 2009).

Suarez (2009), realiza las siguientes definiciones de los tipos de materiales de la Tabla 2:

Roca: Es un material duro y compacto que se encuentra en su posición original e intacta antes que ocurra un movimiento de masa.

Residuos: Este tipo de material contiene una proporción significativa de partículas gruesas. Se clasifica como residuo si las partículas con un diámetro mayor a 2 milímetros superan el veinte por ciento del material.

Tierra: Material compuesto mayormente por partículas finas, con un porcentaje mayor del cincuenta por ciento de estas partículas, sin alcanzar una consistencia líquida.

Lodo: Material con un porcentaje mayor al cincuenta por ciento de partículas finas y presenta una consistencia líquida.

3.4. Unidades geológicas

Durante el análisis de la información geológica desde la represa de Labrado hasta Tuñi, utilizando las hojas geológicas de Cuenca y Gualturo, se identificaron que estas formaciones geológicas abarcan los períodos Cretáceo, Mioceno y Holoceno (Instituto geográfico militar del Ecuador, 2009). En la parte baja de la conducción de Labrado – Tuñi se tienen 3 formaciones que son:

3.4.1. Formación Célica

Se trata de una secuencia volcánica del Cretácico ampliamente extendida en la cordillera Occidental. Se caracteriza por la presencia de capas de andesitas de considerable tamaño, de tonalidad gris verdosa uniforme, alternadas con tobas andesíticas. Además, incluye lavas de dacita y riolita. La formación Célica reposa sobre rocas metamórficas y se sitúa estratigráficamente por debajo de sedimentos volcánicos, aunque en una posición discordante (Baldock, 1982).

3.4.2. Formación Tarqui

Predominan los piroclastos que están formados de aglomerados que van de riolíticos a andesíticos, tobas, cenizas volcánicas e ignimbritas; de las cuales la mayoría han sido caolinizadas y/o silicificadas (Baldock, 1982).

3.4.3. Depósitos aluviales recientes

Estos depósitos son de origen reciente, datan de después de la era glacial, y se han formado a partir de sedimentos transportados y depositados por ríos en las llanuras de inundación. Están constituidos por bloques de gravas y arenas limosas, presentando variaciones significativas en términos de porcentaje y composición. La configuración y el comportamiento del curso fluvial ejercen influencia en la morfología de estos materiales, los cuales pueden variar desde formas redondeadas hasta subangulares (PRECUPA, 1998).

3.5. Caracterización de materiales

La caracterización de materiales implica identificar, medir y describir las propiedades físicas, químicas, mecánicas y estructurales que definen las características de un material. Este procedimiento facilita la comprensión del comportamiento del material ante diversas condiciones, tales como cargas, temperatura, humedad y otros factores ambientales (Brundle, Evans, & Wilson, 1993) . Entre algunos de los tipos de caracterización de materiales se encuentran:

3.5.1. Caracterización del suelo

La caracterización del suelo se basa en la agrupación del suelo según sus características geotécnicas, como la granulometría y la plasticidad. Uno de los sistemas más utilizados es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS por sus siglas en inglés), que categoriza los suelos en dos grupos principales: gruesos (grava y arena) y finos (limo y arcilla), subdividiéndolos en función de su granulometría y plasticidad (Das & Khaled, 2013).

3.5.1.1. Distribución granulométrica

En la distribución granulométrica se utilizan métodos como el tamizado para partículas grandes y la sedimentación para partículas finas, clasificando el suelo en categorías como grava, arena, limo y arcilla. Los resultados se representan en una curva granulométrica, que muestra el porcentaje de partículas que pasan por diferentes tamices. Para esta clasificación se emplean tamices con aberturas de diferentes tamaños, que definen el tamaño máximo de los agregados retenidos en cada uno. En la práctica, se pesan las partículas retenidas en cada tamiz y se expresan como porcentajes del peso total de la muestra (Cañas, 2007). Estos porcentajes se calculan individualmente para cada tamiz y de forma acumulativa, para finalmente determinar el porcentaje que pasa cada tamiz y graficarlo contra el tamaño del tamiz correspondiente.

3.5.1.2. Clasificación según SUCS

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) categoriza los suelos según su tamaño de partícula y su comportamiento plástico. Los suelos de grano grueso, como la grava y la arena, que retienen un porcentaje menor al cincuenta por ciento en el tamiz N° 200, se designan con los prefijos G (grava) o S (arena). Estos suelos están seguidos de símbolos que indican su gradación: W para bien graduado y P para mal graduado. Por otro lado, los suelos de grano fino, como el limo y la arcilla, que permiten el paso de un cincuenta por ciento o más por el tamiz N° 200, se clasifican con los prefijos M (limo) o C (arcilla), acompañados de símbolos que describen su plasticidad (Das & Khaled, 2013).

3.5.2. Caracterización de las rocas

En el ámbito de la geotecnia, la caracterización de las rocas se basa principalmente en su resistencia y durabilidad, (Braja, 2015).

3.5.2.1. Resistencia de la roca con esclerómetro

El esclerómetro, fue usado principalmente para estimar la resistencia a compresión simple del hormigón. Con el tiempo, ha sido adaptado y mejorado, resultando en varios modelos que también son capaces de estimar la resistencia a compresión simple de la roca. Este instrumento es ampliamente utilizado debido a su facilidad de manejo. El ensayo se realiza midiendo la resistencia al rebote de la superficie de la roca bajo evaluación (Lozano, 2009). Se realiza la clasificación de las rocas según su resistencia tal como se ve en la Tabla 3.

Tabla 3 Clasificación de roca según su resistencia a compresión.

Descripción	Resistencia compresión
Extremadamente blanda	< 1 Mpa
Muy Blanca	1-5 Mpa
Blanda	5-25 Mpa
Moderadamente Blanda	25-50 Mpa
Dura	5-100 Mpa
Muy dura	1-5 Mpa
Extremadamente dura	> 250 Mpa

Fuente: Modificado de (ISRM, 1981)

3.5.3. Caracterización del suelo según resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad de los materiales que influye en su capacidad para oponerse al flujo de corriente eléctrica. En términos generales, se puede considerar como el inverso de la conductividad eléctrica, lo que implica que, a mayor resistividad, menor conductividad y viceversa. La medición de la resistividad eléctrica se puede llevar a cabo mediante diversas técnicas como la tomografía eléctrica, sondas de resistencia o la impedancia eléctrica, las cuales posibilitan la evaluación de las variaciones de resistividad en los distintos materiales presentes en el subsuelo (Knödel, Krummel, & Lange, 2005).

En la Tabla 4 se observan rangos de valores comunes de resistividad asociados a diferentes materiales según un estudio realizado por la Universidad Nacional de Colombia (2000), así mismo, en la Tabla 5 se observan valores de clasificación del suelo con respecto a la resistividad eléctrica obtenidos en el estudio de Flores Ramírez (2024), este estudio se realizó en el área baja de la conducción Labrado - Tuñí, el cuál consistió en la correlación de la resistividad eléctrica y las propiedades geotécnicas del suelo. Además de realizar ensayos de resistividad eléctrica, se realizó ensayos granulométricos, límites de Atterberg y perforaciones para establecer la estratigrafía de la zona de estudio.

Tabla 4. Valores comunes de resistividad asociados a diferentes materiales

Material	Resistividad (Ωm)
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolito no saturado	200-500
Saprolito saturado	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arenas no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturados	100-200
Limos saturados	20-100
Limos saturados con agua salada	5-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5-20

Fuente: modificado de (Universidad Nacional de Colombia, 2000).

Tabla 5. Clasificación del suelo y resistividad eléctrica.

Clasificación de suelo	Resistividad Eléctrica (Ωm)
Arcilla de alta plasticidad arenosa	40
Arcilla de alta plasticidad con arena	8-35
Arena arcillosa con grava	4
Arena arcillosa	75
Arena limosa	15-30
Grava arcillosa	200-1800
Grava limosa con arena	1200
Gracia limosa	800
Limo alta plasticidad	4
Limo alta plasticidad con arena	4-10
Limo baja plasticidad	22
Limo baja plasticidad arenosa	8
Limo baja plasticidad con arena	8-12

Fuente: modificado de (Flores Ramirez, 2024)

3.5.3.1. Factores que influyen en la resistividad de los materiales

Según el estudio realizado por Sánchez Reynoso (2011), varios parámetros influencian los resultados de resistividad, según se enumeran a continuación:

- Temperatura: Aumenta la temperatura, disminuye la resistividad.

- Porosidad: Aumenta la porosidad, disminuye la resistividad (si hay fluido conductor presente).
- Salinidad del Fluido: Aumenta la salinidad, disminuye la resistividad.
- Litología: Varía según el tipo de material, por ejemplo, el material ígneo presenta mayor resistividad que el sedimentario.
- Procesos Geológicos: Compactación y otros procesos pueden aumentar la resistividad.
- Presencia de materiales arcillosos con alta capacidad de intercambio catiónico: disminuye la resistividad.

3.6. Tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica es una técnica geofísica utilizada para mapear la distribución de la resistividad eléctrica del subsuelo, tanto en el plano horizontal como en profundidad. La resistividad, se expresa en ohmios-metro (Ωm). Este enfoque permite caracterizar las propiedades eléctricas del subsuelo y facilita la identificación de diversas estructuras y materiales geológicos (Centro Universitario de Mérida, 2020).

La técnica se basa en la evaluación de la resistividad eléctrica del subsuelo mediante cuatro electrodos dispuestos en la superficie. Dos electrodos (A y B) se usan para inyectar corriente eléctrica (I) en el subsuelo, mientras que los otros dos (M y N) miden la diferencia de potencial (U) generada por esta corriente (Patzelt, Kottmann, & Waldhor, 2007). El principio de la medición geo eléctrica se puede observar en la Figura 3.

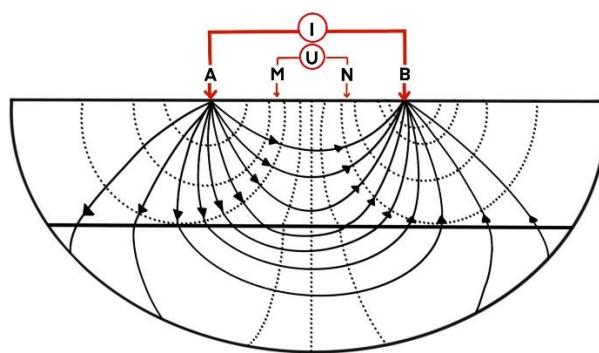


Figura 3. Principio de medición geo eléctrica. Fuente: modificado de (Knödel, Krummel, & Lange, 2005)

Los métodos de resistividad se fundamentan en la medición y análisis de la respuesta eléctrica del subsuelo. Estas técnicas se utilizan para determinar la resistividad aparente de las capas geológicas, lo que permite obtener información aproximada sobre la composición y las características de los suelos y las rocas que se encuentran debajo (Telford, Geldart, & Sheriff, 1990). El procedimiento generalmente sigue los siguientes pasos:

Se realiza la transmisión de corriente eléctrica (I) entre dos electrodos conectados a tierra, colocados en la superficie del terreno para actuar como puntos de inyección de corriente. Simultáneamente, se mide el voltaje (U) entre otros dos electrodos adicionales, también ubicados en la superficie, pero en posiciones diferentes. Esta disposición permite registrar la

diferencia de potencial creada por la corriente transmitida. La resistividad aparente del subsuelo se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho_a = K \cdot \frac{U}{I} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

ρ_a : es la resistividad aparente

U : es el voltaje medido

I : es la corriente transmitida

K : es un factor geométrico que depende de la disposición de los electrodos

3.6.1. Procesamiento de datos

Los datos recogidos se transfieren a una computadora para su procesamiento. Se utiliza un software especializado de inversión para interpretar los resultados y generar un modelo de resistividad del subsuelo. Este software aplica algoritmos matemáticos para ajustar los datos medidos y obtener una representación de las capas geológicas.

3.6.2. Arreglo de electrodos: Dipolo – Dipolo

El arreglo Dipolo-Dipolo es una disposición específica empleada en estudios de resistividad geofísica, donde cuatro electrodos se colocan en una línea recta. Los electrodos A y B constituyen un dipolo de corriente, mientras que los electrodos M y N forman un dipolo de potencial. La distancia entre los electrodos B y M es n veces mayor que la separación entre A y B, así como entre M y N, donde n es un número mayor que uno. Esta configuración permite investigar a mayor profundidad y obtener una resolución de las características del subsuelo (Milsom, 2023) . Esta configuración es particularmente útil para identificar variaciones horizontales de resistividad. El arreglo Dipolo – Dipolo se puede observar en la Figura 4.

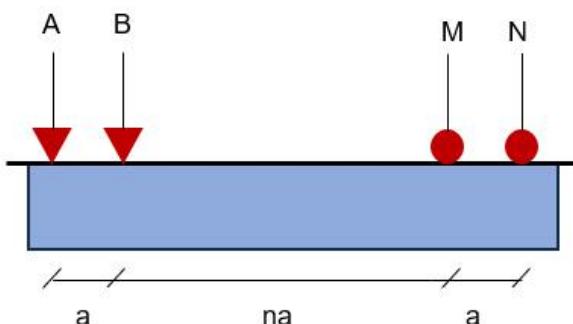


Figura 4. Configuración de electrodos Dipolo – Dipolo. Fuente: Modificado de (Díaz E. , 2010)

La resistividad aparente se determina:

$$\rho_a = -\pi \cdot n \cdot (n + 1) \cdot (n + 2) a \cdot \Delta U / I \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

ρ_a : es la resistividad aparente
n: número mayor que uno
U: es el voltaje medido
 I : es la corriente transmitida
a: separación entre electrodos

3.7. Curvas IDF

La curva IDF, cuyas siglas significan intensidad, duración y frecuencia, es la representación gráfica de diferentes curvas que relacionan estas tres variables asociadas a períodos de retorno distintos. Esta representación se genera a partir de datos históricos de precipitaciones y, a su vez, señala la probabilidad de que ocurran eventos de precipitación (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2013).

3.8. Sistema de Información Geográfica (SIG)

Un Sistema de Información Geográfica (SIG), también conocido como GIS por sus siglas en inglés, es un método que combina información geográfica básica para obtener datos derivados; utiliza tanto datos gráficos (mapas) como alfanuméricos (estadísticas) para analizar y procesar información sobre un área específica. Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de software enfocados en realizar esta tarea de manera eficiente (Bravo, 2000).

En los Sistemas de Información Geográfica (SIG), se utilizan dos modelos computacionales para representar la información. El modelo ráster divide el espacio geográfico en una matriz cuadriculada, donde cada celda o píxel contiene información característica de la zona correspondiente. Por otro lado, el modelo vectorial organiza los datos geográficos según la perspectiva de los datos alfanuméricos puntuales, lo que permite trabajar con tres unidades gráficas: punto, línea y polígono (Buzai, 2013).

3.9. Método semiautomático para delimitación de cuencas

El procedimiento semiautomático para la delineación de cuencas hidrográficas emplea herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con el fin de definir con mayor precisión los límites de las cuencas hidrográficas en una región específica, utilizando información topográfica. Este enfoque implica una secuencia de pasos que se ejecutan a través de un software SIG para llevar a cabo la delimitación de la cuenca hidrográfica (Rosa Ruiz, 2008). A pesar de la variabilidad en el software utilizado, los pasos en este método son consistentes e incluyen:

3.9.1. Modelo digital de elevación

La representación de la topografía o elevación del terreno se consigue a través de un Modelo Digital de Elevación (DEM). Estos modelos son representaciones simbólicas que establecen relaciones de correspondencia con el objeto real mediante algoritmos matemáticos que son procesados mediante programas de Sistemas de Información Geográfica (Rosa Ruiz, 2008).

3.9.2. Dirección de flujo

Este parámetro está determinado, por la dirección más empinada de descendencia de cada píxel en el modelo digital de elevación (DEM) y, se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Cambio de valor } z}{\text{distancia}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

La distancia se calcula entre los centros de las celdas, para los valores de la distancia se asignan los siguientes números enteros :1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128. Por ejemplo, el píxel central inicialmente no tiene un valor asignado, tomando como referencia este píxel, se codificará diferentes valores a los otros píxeles dependiendo de la dirección más empinada; si la dirección más empinada está hacia la derecha, se codificará con el valor 1; si está hacia la izquierda, se codificará con el valor 16. De esta manera, se asigna un valor diferente dependiendo de la dirección del descenso, como se muestra en la Figura 5. Con este proceso de codificación, se le otorga a cada píxel que se encuentra en el modelo de elevación digital un nuevo valor para generar la información correspondiente a la dirección de flujo como se observa en la Figura 6. En caso de que uno de los píxeles adyacentes no contenga datos, no se generará información correspondiente a ese píxel, esto generalmente sucede en los píxeles de borde (Rosa Ruiz, 2008).

32	64	128
16		1
8	4	2

Figura 5 Valores de las distancias para cada dirección del centro de las celdas. Fuente: Modificado de (Rosa Ruiz, 2008)

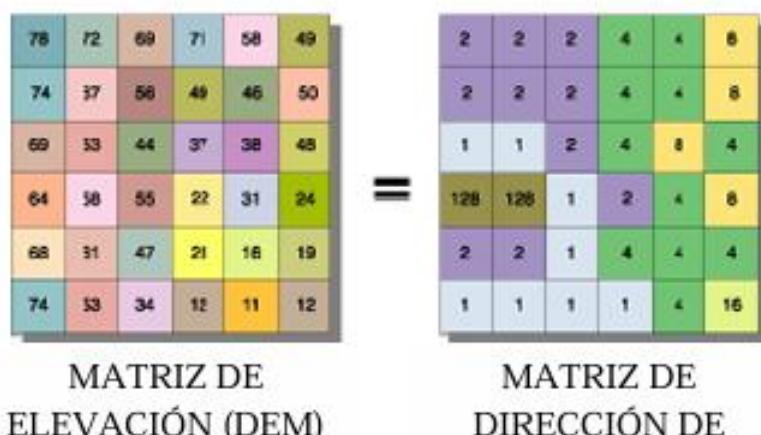


Figura 6 Demostración de un cambio de un DEM a una matriz de dirección de flujo. Fuente: (Rosa Ruiz, 2008)

3.9.3. Acumulación de flujo

El flujo acumulado se determina por la cantidad de píxeles que convergen hacia un píxel de salida específico. Los píxeles de salida con una elevada concentración de flujo denotan la red de drenaje, en contraste, aquellos píxeles de salida con una acumulación de flujo igual a cero se asocian con puntos topográficos elevados. Por ejemplo, de la Figura 7 en el píxel señalado, de la matriz de dirección de flujo se codificó las direcciones de acuerdo a un valor, con esta codificación se conoce que el número 4 indica la dirección hacia abajo y el número 8 indica la dirección hacia abajo a la izquierda, contando el número de píxeles que fluyen hacia el píxel señalado se tiene un valor de 4 el cual es representado en la matriz de acumulación de flujo. Los resultados de la acumulación de flujo se representan en una matriz (Rosa Ruiz, 2008).

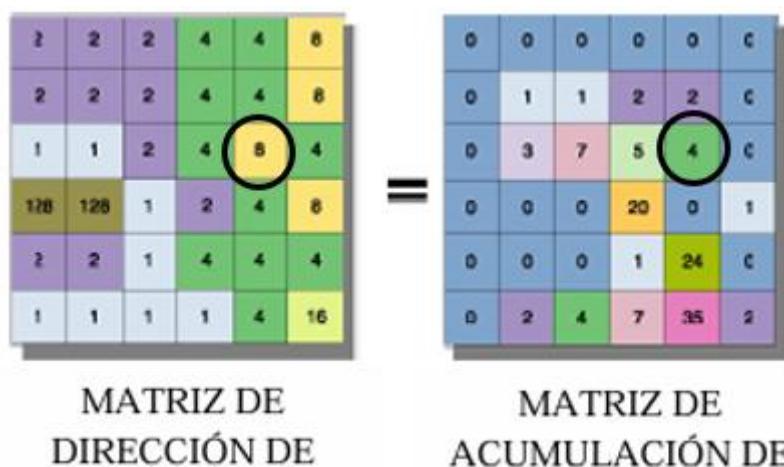


Figura 7 Demostración de un cambio de la matriz de dirección de flujo a una matriz de flujo acumulado. Fuente: (Rosa Ruiz, 2008)

3.9.4. Enlaces de transmisión (Stream Links)

En una red de drenaje lineal matricial, se asignan valores distintivos a las secciones que se encuentran entre los puntos de intersección. Los enlaces representan las secciones de la red de drenaje donde se unen dos confluencias consecutivas, una confluencia y el punto de salida, o un punto de inicio y una confluencia (Rosa Ruiz, 2008). En la Figura 8, se puede observar los enlaces e intersecciones que se forman en una red de drenaje; la fecha indica la dirección del flujo de agua, los puntos rojos indican las intersecciones en los cursos de agua y las líneas representan el curso de agua.

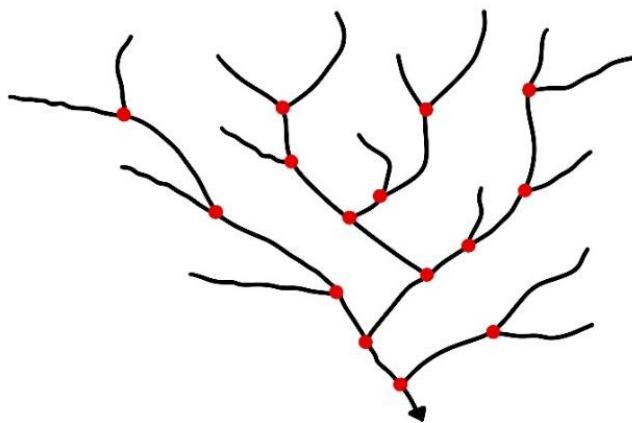


Figura 8 Demostración de los enlaces e intersecciones que se forman en una red de drenaje. Fuente: Modificado de (Rosa Ruiz, 2008)

3.9.5. Watershed (área de captación)

Un área de captación, también denominada cuenca hidrográfica, constituye un territorio del cual el agua que se recoge en esta zona, converge hacia un punto de salida principal; se trata del espacio geográfico encargado de acumular el agua que fluye en dirección a un punto específico, como un río, lago o mar. Esta región se caracteriza comúnmente como la extensión total que contribuye al flujo hacia una salida determinada (Rosa Ruiz, 2008). Como se observa en la Figura 9 la zona de tono gris es una microcuenca, el punto rojo al inicio es el punto de captación del agua, el punto rojo al final es el punto de desembocadura y la línea azul es el cauce principal que conduce el agua.

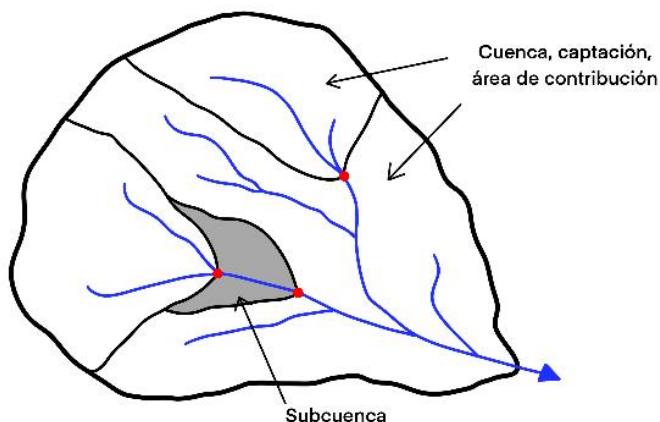


Figura 9 Formación de los watershed en programa SIG. Fuente: (Rosa Ruiz, 2008)

3.10. Método Mora & Varhson

Desarrollado por Sergio Mora y Wilhelm Varhson en 1993 aplicado en una zona de Tapanti, Valle Central de Costa Rica. Es un instrumento concebido para prevenir el riesgo de eventos de movimientos en masa. Este método contempla cinco variables: topografía relativa, tipo de roca, contenido de humedad del suelo (factores pasivos), junto con actividad sísmica e intensidad de precipitaciones (factores activos). Los elementos pasivos se combinan para evaluar la susceptibilidad, mientras que los elementos activos actúan como

desencadenantes que perturban el equilibrio de las laderas (Mora & Varhson, Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica., 1992).

Esta herramienta posibilita el análisis y la zonificación de la amenaza relativa de movimientos de masa a través de la utilización de indicadores morfodinámicos. Su propósito radica en identificar las áreas críticas potenciales y priorizarlas con el fin de definir las zonas con mayor susceptibilidad a los movimientos de masa, empleando un enfoque probabilístico. No obstante, es fundamental considerar que este enfoque es de naturaleza preliminar; Por consiguiente, al delimitar las áreas críticas, se requiere llevar a cabo investigaciones y evaluaciones más detalladas para validar los resultados obtenidos (Díaz E. , 2010).

Los indicadores morfodinámicos que se emplean en el método Mora & Varhson se pueden clasificar en dos grupos según su comportamiento: condicionantes, también conocidos como intrínsecos, y desencadenantes, también llamados externos. (Servicio Nacional de Estudios Territoriales, 2004).

Entre los factores condicionantes se encuentran:

- La morfología o el relieve se considera el factor más influyente, ya que se requiere una pendiente específica para que ocurran los movimientos de masas.
- La geología, o factor litológico, es determinante en los movimientos de masas en diferentes tipos de suelos y rocas. Características como la composición, resistencia, deformabilidad, grado de alteración, fracturación, porosidad y permeabilidad influyen en la posibilidad de que el terreno sufra roturas y desplazamientos.
- Factor de humedad, tiene un impacto negativo en las características de las zonas de estudio; ya que reduce la resistencia del terreno, aumenta su peso y contribuye a la meteorización.
- Factor de cobertura vegetal, según su tipología, la presencia, modificación o falta de vegetación puede tener un impacto en la ocurrencia de movimientos en masa.

Entre los factores desencadenantes se encuentran:

- Lluvia dependiendo de la duración, intensidad, distribución de las precipitaciones se pueden generar movimientos de masa.
- Sismicidad dependiendo de la magnitud, distancia al epicentro y las características de los suelos pueden llegar a producir derrumbes o movimientos de masa.

Identificando los factores condicionantes y desencadenantes se puede determinar el grado de susceptibilidad a los movimientos de masa como el producto de estos dos factores (Jefferson & Joao, 2016).

$$H = P \cdot D \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

H: grado de susceptibilidad a movimientos de masa

P: valor del producto de la combinación de los factores condicionantes

D: valor del factor de disparo

Por su parte los valores de los factores condicionantes se componen de:

$$P = S_l \cdot S_p \cdot S_h \cdot S_c \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

SL: valor del parámetro de la susceptibilidad litológica

SP: valor del parámetro de pendiente

SH: valor del parámetro de humedad del terreno

SC: valor del parámetro de cobertura del suelo

En cambio, el factor de disparo se compone de:

$$D = DLL + DS \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

DLL: valor del parámetro de disparo por lluvia

DS: valor del parámetro de disparo por sismicidad

Sustituyendo los parámetros en la ecuación original se expresa el grado de susceptibilidad a movimientos de masa de la siguiente manera:

$$H = (S_l \cdot S_p \cdot S_h \cdot S_c) \cdot (D_{LL} + D_S) \quad \text{Ecuación 7}$$

El resultado de la combinación de todos los factores, según lo descrito en la ecuación 7, no se asigna a una escala única de valores del indicador, ya que estos deben adaptarse a las condiciones específicas de cada área de estudio. Sin embargo, se sugiere dividir el rango de valores obtenidos para cada área en cinco categorías de susceptibilidad y asignar los términos descriptivos presentados en la Tabla 6 (Barrantes, 2015). Estos términos de susceptibilidad representan cualitativamente los distintos niveles de susceptibilidad, y no constituyen una amenaza en sí misma.

Tabla 6 Clasificación y caracterización de la susceptibilidad al deslizamiento

Clase	Calificativo de susceptibilidad de movimiento de masa	Características
I	Muy baja	Sectores estables. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios imprescindibles como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc.
II	Baja	Sectores que requieren medidas correctivas menores, solamente en caso de obras de infraestructura de gran envergadura. Se debe considerar la influencia de los sectores aledaños con susceptibilidad de moderada a muy alta. Sectores aptos para usos urbanos de alta densidad y ubicación de edificios indispensables como hospitales, centros educativos, estaciones de policía, bomberos, etc. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado.
III	Moderada	No se recomienda la construcción de infraestructura si no se realizan estudios geotécnicos y se mejora la condición del sitio. Las mejoras pueden incluir: movimientos de tierra, estructuras de retención, manejo de aguas superficiales y subterráneas, reforestación, entre otros. Los sectores con rellenos mal compactados son de especial cuidado. Recomendable para usos agropecuario.
IV	Alta	No se recomienda la construcción de infraestructura, para su utilización se deben realizar estudios de estabilidad a detalle y la implementación de medidas correctivas que aseguren la estabilidad del sector, en caso contrario, deben mantenerse como áreas de protección.
V	Muy alta	No se recomienda la construcción de infraestructura, se recomienda como áreas de protección.

Fuente: Modificado de (Mora & Varhson, Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination, 1994)

3.10.1. Parámetro de pendiente (SP)

El parámetro SP se calcula a partir de un modelo de pendientes en lugar del índice de relieve relativo; esta modificación se lleva a cabo debido a la categorización más simplificada del nivel de riesgo en relación con la topografía. La clasificación de este parámetro comprende pesos relativos que van desde 1 para una pendiente baja ($0 - 2^\circ$) hasta un valor máximo de 6 para pendientes muy fuertes ($>55^\circ$) como se observa en la Tabla 7 (Segura, Badilla, & Obando, 2011).

Tabla 7 Valoración del parámetro S_p

Pendiente Grados	Condiciones del terreno	Color sugerido	Valor del parámetro S_p
0-2	Planicie, sin denudación apreciable.	Verde oscuro	0
2-4	Pendiente muy baja, peligro de erosión.	Verde claro	1
4-8	Pendiente baja, peligro severo de erosión.	Amarillo	2
8-16	Pendiente moderada, deslizamientos accionales, peligro severo de erosión	Naranja	3
16-35	Pendiente fuerte, procesos de deslizamientos, peligro extremo de erosión de suelos.	Rojo claro	4
35-55	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos de deslizamientos intensos, reforestación posible.	Rojo oscuro	5
> 55	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos de deslizamientos severos (caída de rocas), cobertura vegetal limitada.	Morado	6

Fuente: modificado de (Mora & Varhson, Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica., 1992).

3.10.2. Parámetro de susceptibilidad litológica (SL)

Basándose en la litología del área, es posible determinar su capacidad de retención de agua, espesores, grado de meteorización, entre otros aspectos. Esta información permite comprender la influencia de dichos factores en la estabilidad o inestabilidad de los taludes (Jefferson & Joao, 2016) . Para la metodología de Mora & Varhson, el parámetro de susceptibilidad litológica SL se estima de acuerdo a la litología, donde se revisan las cartas geológicas de la zona y se da una valoración en función de la Tabla 8.

En caso de que se hayan documentado movimientos de masa anteriores en las unidades geológicas, es necesario asignar a estos sitios una evaluación distinta a la de la unidad geológica a la que pertenecen. Esta reevaluación se realiza a través de un inventario de los movimientos de masa ocurridos en cada unidad geológica con el propósito de calcular la densidad de desplazamientos de masa por unidad geológica, es decir, el porcentaje de área afectada por movimientos de masa en cada unidad geológica (Segura, Badilla, & Obando, 2011).

Los pesos asignados en cada unidad geológica en función de los movimientos de masa se determinan de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$S_L = D_1/D_2 \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

D1: Densidad de movimientos de masa para cada formación

D2: Densidad de movimientos de masa para el área de estudio

$$D1 = \frac{\text{Área de deslizamiento para cada formación}}{\text{Área de cada unidad geológica}}$$

Ecuación 9

$$D2 = \frac{\text{Área total de deslizamiento}}{\text{Área total de estudio}}$$

Ecuación 10

Tabla 8 Clasificación de las diferentes litologías y su grado de susceptibilidad

Litología	Características físico-mecánicas	Grado de susceptibilidad	Valor factor SI
Aluviones: gruesos, compacto. Calizas: duras. Intrusivos: poco fisurados. Basaltos, andesita, ignimbritas y similares: sanas. Rocas metamórficas: sanas.	Sanos con poca o ninguna meteorización, resistencia a la corte elevada, fisuras sanas sin rellenos.	Bajo	1
Rocas sedimentarias: poco alteradas, estratificación maciza. Rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas o metamórficas: alteradas.	Resistencia al corte de media a elevada, fracturas cizallables	Moderado	2
Rocas sedimentarias, rocas intrusivas, calizas duras, lava, ignimbritas, tobas poco soldadas o metamórficas: medianamente alteradas. Coluvios, lahares, arenas, suelos regolíticos levemente compactados.	Resistencia al corte: moderada a media, fracturación importante	Medio	3
Aluviones fluvio-lacustres, suelos piroclásticos poco compactados, sectores de alteración hidrotermal, rocas fuertemente alteradas y foliaciones a favor de la pendiente, con rellenos arcillosos, niveles freáticos someros.	Resistencia al corte: moderada a baja.	Alto	4
Materiales aluviales, coluviales y regolíticos de muy baja calidad mecánica: con estado de alteración avanzado, se incluyen las categorías 3 y 4.	Resistencia al corte: muy baja, materiales blandos con muchos finos	Muy alto	5

Fuente: Modificado de (Chaberri Molina, 2016)

3.10.3. Parámetro de humedad (SH)

Para determinar el contenido de humedad del suelo, es posible emplear métodos directos e indirectos. El enfoque directo implica la toma de muestras *in situ* y la posterior realización de pruebas de laboratorio para determinar la humedad del suelo. Por otro lado, el enfoque indirecto implica la recopilación de datos sobre la precipitación mensual promedio y la evapotranspiración mensual promedio en la zona de estudio, y a través de la resta de estos

valores, se estima de forma aproximada la humedad del suelo. La humedad estimada mediante cualquiera de estos métodos se expresa en mm/mes (Chaberri Molina, 2016).

Determinado el valor de la humedad del suelo se le asigna un peso a cada uno de los meses que va desde 0 hasta 2, como se observa en la Tabla 9.

Tabla 9 Clasificación de los pesos asignados a la humedad promedio mensual

Humedad media mensual (mm/mes)	Valor
< 125	0
125 – 250	1
> 250	2

Fuente: Modificado de (Mora & Varhson, *Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination*, 1994)

La suma de todos los meses se debe encontrar en un valor entre 0 y 24, con estos valores se clasifica en una de las cinco categorías del parámetro SH que se observa en la Tabla 10.

Tabla 10 Valoración del parámetro de humedad S_H

Suma de valores asignados a cada mes	Descripción	Valoración del parámetro Sh
0-4	Muy bajo	1
5-9	Bajo	2
10-14	Medio	3
15-19	Alto	4
20-24	Muy alto	5

Fuente: Modificado de (Mora & Varhson, *Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination*, 1994)

3.10.4. Parámetro de cobertura vegetal (SC)

La cobertura vegetal está relacionada con la estabilidad del terreno. Según un estudio realizado por Ovalle, Rodríguez, Osman, Espinoza, y Pozo (2020), la cobertura vegetal ofrece importantes beneficios para la protección y estabilización del suelo. La vegetación reduce la erosión al disminuir la velocidad y cantidad de lluvia que llega al suelo, lo que minimiza la disgregación. Además, las raíces de las plantas podrían beneficiar la estructura del suelo y controlar la escorrentía superficial. Sin cobertura vegetal, el suelo estaría más expuesto a la infiltración de agua, lo que podría incrementaría la escorrentía superficial y, con ello, la erosión.

Para determinar cómo influye la cobertura vegetal se debe identificar los tipos de vegetación como bosques, pastizales, cultivos, etc. Para asignar una valoración a cada tipo de vegetación y su grado de alteración, se realiza una clasificación según la Tabla 11.

Tabla 11 Valoración del factor de cobertura del suelo SC

Nivel	Uso de suelo	Cobertura de suelo	Valor
Área sin cobertura vegetal	Tierras improductivas	Deslizamientos	4
Bosque Nativo	Conservación y protección	Bosque húmedo poco alterado	3
Plantación forestal	Protección o Producción	Pino	1
Vegetación arbustiva	Conservación y protección	Matorral húmedo medianamente alterado	3
	Conservación y protección	Matorral húmedo poco alterado	3
Pasto cultivado	Pecuario	Pasto cultivado	2
Páramo	Conservación y protección	Páramo arbustivo medianamente alterado	2
	Conservación y protección	Páramo arbustivo muy alterado	4
	Conservación y protección	Páramo arbustivo poco alterado	1
	Conservación y protección	Páramo herbáceo medianamente alterado	3
	Conservación y protección	Páramo herbáceo muy alterado	4
	Conservación y protección	Páramo herbáceo poco alterado	1
Vegetación herbácea	Conservación y protección	Vegetación herbácea húmeda poco alterada	1

Fuente: Modificado de (Cabrera, 2021)

3.10.5. Parámetro de disparo por lluvia (D_{LL})

En el parámetro de disparo por lluvia, se analiza el impacto de las precipitaciones en la ocurrencia de movimientos en masa. La metodología de cálculo varía en función de la disponibilidad de datos. En situaciones donde se disponen de registros de precipitación inferiores a 10 años, se emplea la media aritmética de las precipitaciones. Por otro lado, en casos donde se cuenta con registros que superan los 10 años, se estima la precipitación máxima en 24 horas para un periodo de retorno de 100 años, empleando métodos de distribución de valores extremos como Gumbel Tipo I o Log Pearson Tipo III. Estos métodos permiten modelar el valor máximo de precipitación esperado para cualquier periodo de retorno (Chaberri Molina, 2016). La descripción de este parámetro va desde muy bajo a muy alto y se le asigna un valor de 1 a 5, considerando la precipitación máxima en los rangos definidos como se ve en la Tabla 12.

Tabla 12 Valores para el parámetro de disparo por lluvia

Precipitación máxima (mm/día) con un registro mayor a 10 años	Precipitación máxima (mm/día) con un registro menor a 10 años	Descripción	Factor DLL
< 100	< 50	Muy bajo	1
101 – 200	50 – 90	Bajo	2
201 – 300	91 – 130	Medio	3
301 – 400	131 – 175	Alto	4
> 400	> 175	Muy alto	5

Fuente: Modificado de (Mora & Varhson, Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination, 1994)

3.10.6. Parámetro de disparo por sismicidad (Ds)

En el parámetro de disparo por sismicidad se debe analizar la influencia de la actividad sísmica, en la cual se relaciona la intensidad de Mercalli modificada con los índices de influencia de la sismicidad, definiendo diez clases para cada situación específica; estas clases permiten una evaluación de la amenaza sísmica en función de la intensidad y la frecuencia de los eventos sísmicos. Como recomendación se debe emplear periodos de retorno de 100 años (Díaz F., 2004). Para los valores de este parámetro, se puede asignar un rango de 1 a 10, considerando la clasificación de intensidad que se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13 Valores para el parámetro de disparo por sismicidad

Intensidad Mercalli-Modificada	Aceleración Pico (%g)	Aceleración PGA (m/s ²)	Calificación	Valor Ds
III	01-12	0,098 - 1,226	Leve	1
IV	13-20	1,227 - 2,011	Muy bajo	2
V	21-29	2,012 - 2,894	Bajo	3
VI	30-37	2,895 - 3,679	Moderado	4
VII	38-44	3,680 - 4,365	Medio	5
VIII	45-55	4,366 - 5,445	Elevado	6
IX	56-65	5,446 - 6,426	Fuerte	7
X	66-73	6,427 – 7210	Bastante fuerte	8
XI	74-85	7,211 - 8,388	Muy fuerte	9
XII	>85	> 8,389	Extremadamente fuerte	10

Fuente: Modificado de (Mora & Varhson, Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination, 1994)

3.10.7. Índice de susceptibilidad

El resultado de la combinación de todos los factores condicionales y de disparo se conoce como índice de susceptibilidad. Este índice no puede ser representado por un único valor, sino por un intervalo de valores que se dividen en cinco categorías de susceptibilidad, cada una con sus correspondientes descripciones como se observa en la Tabla 14 (Jefferson & Joao, 2016).

Tabla 14 Grado de amenaza de acuerdo al potencial de susceptibilidad

Potencial	Clase	Grado de amenaza
0 – 6	I	Muy baja
7 – 32	II	Baja
33 – 512	III	Moderado
513 – 1251	IV	Alto
> 1251	V	Muy alta

Fuente: Modificado de (Mora & Varhson, Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination, 1994)

La distribución espacial de estos factores e indicadores, ya sea de forma individual o en combinación, se puede representar en cualquier tipo de unidad de cuadrícula (píxel), la mayoría de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) pueden procesar automáticamente este tipo de datos. Los resultados del procesamiento de datos permiten identificar las áreas más susceptibles y problemáticas (Mora & Varhson, Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination, 1994).

3.11. Estrategias de mitigación de movimiento de masas

La mitigación se define como el conjunto de medidas aplicables cuyo fin principal es minimizar al máximo el impacto destructivo y alarmante producto de un desastre. Este conjunto de medidas constituye un tipo de intervención los cuales se aplican en la gestión para control y prevención de riesgos y desastres (Caballero Iparraguirre, 2018). Entre las técnicas de mitigación se encuentran:

3.11.1. Hidrosiembra

La hidrosiembra es una técnica de revegetación que permite estabilizar los suelos de los taludes. Este método requiere menos tiempo en su aplicación en comparación con la siembra convencional. Esta técnica se basa en la aplicación de una mezcla de semillas, abonos, estabilizantes y otros aditivos sobre el terreno mediante un sistema de proyección hidráulica (Julca , Linares , & Quinteros , 2021).

3.11.2. Revestimiento de hormigón lanzado

El revestimiento de hormigón lanzado es una técnica utilizada para estabilizar y reforzar terrenos susceptibles a movimientos de masa. Este método consiste en la proyección de una mezcla de concreto que recubre a barras de acero ordenadas de forma simétrica sobre una superficie lo cual construye una capa protectora que previene la erosión y estabiliza el suelo (Monteros Sarsosa, 2012).

3.11.3. Plantación vegetal en barrera

La plantación vegetal en barrera consiste en establecer franjas de vegetación densa a lo largo de una pendiente o talud. Las plantas que se utilizan en esta técnica deben ser plantas perennes que se ajusten a las condiciones del suelo y que cuenten con sistemas radiculares profundos y extendidos y que puedan proporcionar una estructura de soporte efectiva en el suelo (Universidad de Córdoba, 2014). En Ecuador, algunas plantas perennes incluyen cactus, suculentas, palmeras y helechos.

3.11.4. Muro de pie de talud

Un muro de pie de talud o muro de contención de talud, es una estructura que se construye en la base de una pendiente o talud cuyo fin es proporcionar soporte y estabilización. Este tipo de muro se utiliza principalmente para prevenir o retener deslizamientos de tierra y controlar la erosión en terrenos con pendientes pronunciadas o inestables. Esta técnica se encarga de modificar el perfil natural y de esta manera se suaviza la pendiente (Universidad de Córdoba, 2014). Un tipo de muro sencillo de construir y relativamente económico es el llamado tierra armada.

3.11.4.1. Muro de tierra armada

Son sistemas cuyo componente principal son materiales terreos. Estos muros de retención se caracterizan por utilizar comúnmente refuerzos horizontales y en ocasiones refuerzos verticales intercalados en un suelo compactado y granular. Estos refuerzos, comúnmente de acero galvanizado u otros materiales duraderos como acero inoxidable, aluminio, plástico o geosintéticos proporcionan la estabilidad necesaria para sostener el terreno (Pantigozo Huamani, 2021).

3.11.5. Escalonamiento del terreno

El escalonamiento del terreno es una técnica que se utiliza para reducir o prevenir los movimientos de masas de tierra. Este método se basa en crear escalones o terrazas intercaladas en la pendiente natural del terreno, formando plataformas horizontales o ligeramente inclinadas entre las secciones verticales del área. Estos escalones se encargan de romper la continuidad y la inclinación del talud, reduciendo así la posibilidad de que se produzcan estos movimientos (Patiño, 2019).

3.11.6. Mallas o redes orgánicas

Están compuestos por fibras que pueden ser naturales o sintéticas. Estas mallas se emplean frecuentemente para reforzar otros productos geotécnicos como mantas, o en áreas con materiales cuya granulometría es gruesa como gravas o pizarras. Su uso consiste en retener los finos durante la escorrentía y aportar materia orgánica lo que, a su vez, favorece la formación de suelo y a frenar la erosión. Otra característica de este sistema es que estos pueden controlar la evapotranspiración del suelo mejorando las condiciones de humedad de este (Universidad de Córdoba, 2014).

3.11.7. Geoceldas

Las geoceldas son estructuras tridimensionales de confinamiento celular fabricadas con tiras de materiales geosintéticos de elevada densidad como poliéster, polietileno o polipropileno. Estas tiras están perforadas para simplificar el movimiento lateral de partículas de suelo o agregados. El diseño de cavidades o alveolos permite contener materiales y adaptarse a diferentes tipos de suelo según la altura de las celdas. Además, el uso de tendones y la densidad de celdas por metro cuadrado, fortalecen las geoceldas haciéndolas adecuadas para ser empleadas en pendientes pronunciadas y además de proporcionar un entorno estable para el desarrollo vegetal (Universidad de Córdoba, 2014).

3.11.8. Drenajes

Los drenajes y subdrenajes son cruciales como medidas preventivas ante deslizamientos, centrando su metodología en el análisis y diseño del flujo de agua tanto en la superficie como en el subterráneo para mejorar la estabilidad del talud. Los sistemas de drenaje superficial, que captan el agua de lluvia en la superficie del talud mediante diversas estructuras, buscan reducir la infiltración y prevenir la erosión. Por otro lado, los sistemas de subdrenaje, considerados como los más efectivos para mitigar deslizamientos, se enfocan en reducir las presiones de poros subterráneas para mejorar la resistencia del suelo. Dada la heterogeneidad de los taludes, la implementación de sistemas de subdrenaje suele ser más compleja en comparación con los sistemas superficiales (Ríos & Villagaray, 2021).

4. Metodología

Se desarrolló una metodología integral que abarca varias etapas: recolección de datos, caracterización del suelo, análisis de movimientos de masa, mapeo de susceptibilidad y formulación de medidas de mitigación.

4.1. Recolección de información

Para el análisis de la zona de estudio, se recopiló diversa información como curvas de nivel, ortofotos, fotografías aéreas, información geológica, datos de precipitaciones, cobertura del suelo, curvas IDF, datos de evapotranspiración y datos de sismicidad. Esta integración de información permitió una visión comprensiva de la zona baja de la conducción Labrado – Tuñi.

Curvas de nivel: se utilizó la información correspondiente a las curvas de nivel de la cuenca del Machángara proporcionadas por la empresa Elecausto. Estas curvas de nivel están espaciadas cada 20 metros.

Ortofotos con dron: El establecimiento del vuelo de dron se realizó de manera manual debido a la falta de señal de internet para realizarlo de manera automática, durante el vuelo manual se tomó las fotografías de la zona de interés.

Fotografías: Se realizó una búsqueda de fotografías aéreas y satelitales tanto de años recientes como pasados para compararlas y buscar evidencia de movimientos de masa recientes. Estas fotografías se obtuvieron de Google Earth.

Información geológica: se obtuvo a partir de la información de los mapas geológicos correspondientes a la ciudad de Cuenca (Instituto geográfico militar del Ecuador, 2009) y Gualleturo (Instituto Geográfico Militar, 1973), además se recolectó información correspondiente a un estudio realizado por la Universidad del Azuay (2024) en la elaboración de mapas geológicos para las zonas del Azuay y Cañar para usarlos en programas SIG.

Precipitaciones: se obtuvo información a partir de los anuarios meteorológicos sobre los datos históricos de precipitaciones mensuales de la estación EL Labrado – Tuñi del INAHMI, además de datos diarios de precipitaciones de la misma estación proporcionados por ETAPA, y también se obtuvo información de precipitaciones diarias desde el año 2014 al

año 2019, proporcionada por el departamento del PROMAS de la Universidad de Cuenca, de la estación Chanlud.

Volumen de agua contenida en el suelo: Se obtuvieron estos datos de la información proporcionada por ETAPA, de la estación de El Labrado, correspondientes al período de 2015 a 2024.

Cobertura del suelo: La información se obtuvo a través de la página web del Ministerio de Agricultura y Ganadería, esta información corresponde al año 2020 y contiene principalmente la ubicación y densidad de los bosques, pastizales, usos del suelo, infraestructuras y fuentes de agua que se encuentran distribuidas en todo el territorio del Ecuador. La información del Ministerio de Agricultura y Ganadería se divide en 5 categorías. Se utilizó la categoría 3, la cual indica el grado de alteración de la cobertura vegetal, el tipo de cultivo, árboles presentes, la presencia de áreas erosionadas y centros poblados.

Datos de evapotranspiración: esta información se obtuvo de un estudio para determinar el balance hídrico en la cuenca del Machángara realizado por la Universidad de Cuenca (Carchi, 2015).

Datos de sismicidad: esta información se obtuvo del mapa para diseño sísmico de la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-DS, 2015), donde se clasifica los sectores en función de los porcentajes de PCA para todo el país.

4.2. Exploración y caracterización

Con la recopilación de información y los recorridos de campo, se establecieron los sitios clave para caracterizar el suelo. La caracterización se realizó a través de ensayos de: granulometría, límites de Atterberg y resistividad eléctrica.

4.2.1. Identificación de puntos de análisis

Se realizaron inspecciones in situ para evaluar visualmente las condiciones del terreno y detectar signos de movimientos de masa. Además, se contó con la colaboración de personal de Elecausto, quienes aportaron con el historial del comportamiento del sitio, respecto a movimientos de masa. Para determinar los sitios de muestreo de material para la caracterización del suelo, se consideró el cambio en el tipo de suelo observado durante los recorridos de campo; además de los signos o historial de inestabilidad recopilados. Para los ensayos de resistividad eléctrica, se consideraron dos ubicaciones: el talud de una quebrada con movimientos de masa, y otro talud cercano a una quebrada donde la vegetación había sido modificada por acción humana.

Para complementar la identificación de movimientos de masa, se utilizaron fotografías de Google Earth, y se realizaron ortofotos en puntos de mayor interés, seleccionados por sus características particulares.

4.2.2. Muestras para ensayos de granulometría y límites de Atterberg

El proceso de extracción de las muestras se llevó a cabo de manera superficial, retirando la capa vegetal en todos los puntos de extracción. Con ayuda de una pala, se extrajo la

cantidad necesaria para el ensayo de granulometría y límites. Posteriormente, las muestras fueron almacenadas en fundas plásticas y envueltas en papel film para evitar la pérdida de humedad. Finalmente, fueron guardadas en un lugar adecuado, protegidas de la exposición directa a los rayos solares y trasladadas, al laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca. Con las muestras recolectadas se realizan ensayos de:

4.2.3. Granulometría

4.2.3.1. Determinación de humedad

Antes de realizar los ensayos de granulometría y límites de Atterberg, se recolectaron dos taras con suelo de cada muestra para determinar la humedad del campo. Para determinar la humedad se aplicó la norma ASTM D2216-10.

Inicialmente, se mide la masa de la muestra húmeda colocada en una tara de laboratorio, luego se seca en el horno por 24 horas, y se determina la masa de la muestra seca. Para calcular la humedad, se emplea la siguiente ecuación:

$$\omega(\% \text{ humedad}) = \frac{W_{\text{húmedo}} - W_{\text{seco}}}{W_{\text{seco}}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

$W_{\text{húmedo}}$ = masa de la muestra húmeda

W_{seco} = masa de la muestra seca

Para el ensayo de granulometría se siguió las recomendaciones de la norma ASTM D 2487 y ASTM D 422.

Equipo:

- Balanza
- Agitador
- Horno a temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- Juego de tamices con tapa y fondo
- Herramientas y utensilios: cuchareta, bandejas, cepillos

Para la clasificación del suelo se usó el siguiente juego de tamices mostrado en la Tabla 15 y la Tabla 16, correspondientes tamices para gruesos y tamices para finos respectivamente:

Tabla 15. Juego de tamices para granulometría gruesos.

Tamiz	
Abertura	Diámetro
2 1/2"	63.50
2"	50.00
1 1/2"	37.50
1"	25.00
1/2"	19.00
3/8"	9.50
N.º 4	4.75
Fondo	

Fuente: modificado de (ASTM INTERNATIONAL D2487-11, 2011)

Tabla 16. Juego de tamices para granulometría finos.

Tamiz	
Abertura	Diámetro
N.º 4	4.750
N.º 8	2.375
N.º 10	2.000
N.º 40	0.425
N.º 100	0.149
N.º 200	0.075
Fondo	

Fuente: modificado de (ASTM INTERNATIONAL D2487-11, 2011)

Para el procedimiento para gruesos y finos se tomó como referencia la Tabla 17, para escoger el tamaño mínimo de la muestra para realizar estos ensayos.

Tabla 17. Tamaño mínimo de la muestra.

Diámetro nominal de las partículas más grandes	Tamaño mínimo de muestra
9,5 mm (3/8")	500 g
19,0 mm (3/4")	1000 g
25,4 mm (1")	2000 g
38,1 mm (1 ½")	3000 g
50,8 mm (2")	4000 g
76,2 mm (3")	5000 g

Fuente: Modificado de (ASTM INTERNATIONAL D 422-63, 2002)

4.2.3.2. Procedimiento para gruesos

En este proceso, se seleccionan los juegos de tamices de acuerdo a la Tabla 15. Una vez secado el material en el horno, se fijan los tamices a la máquina de tamizado para gruesos. Se coloca la cantidad de muestra para cada ensayo según la Tabla 17 y, se enciende la máquina durante cinco minutos. Después de este período, se realiza un tamizado manual. Posteriormente, se pesa el material de cada tamiz. Con los pesos obtenidos de cada tamiz, se calcula el porcentaje que pasa por cada uno de estos (ASTM INTERNATIONAL D2487-11, 2011).

4.2.3.3. Procedimiento para finos

Del material retenido en el fondo del proceso de tamizado de gruesos, se realiza un cuarteo y se extrae aproximadamente de 500 g a 1000 g de cada muestra. Se realiza el lavado del material sobre el tamiz 200 y, se procede al secado en horno. Posteriormente, se monta el juego de tamices según lo indicado en la Tabla 16. Se coloca el juego de tamices con la muestra en la máquina de tamizado para finos durante cinco minutos. Tras este proceso, se realiza un tamizado manual y, se pesa el material de cada tamiz (ASTM INTERNATIONAL D2487-11, 2011) . Finalmente, se procede a realizar la curva granulométrica con los resultados del proceso de gruesos y finos.

Para el cálculo del porcentaje que pasa, primero se calcula el porcentaje retenido en cada tamiz con la ecuación 12, posterior se calcula el peso retenido acumulado con la ecuación 13,

y finalmente este resultado se usa para el cálculo del porcentaje que pasa usando la ecuación 14.

$$\% \text{ Retenido}_{\text{cada tamiz}} = \frac{P_p}{P_t} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

P_p = Peso retenida en cada tamiz (g)

P_t = Peso total (g)

$$\% \text{ Retenido}_{\text{Acumulado}} = \Sigma \% \text{ Retenido}_{\text{cada tamiz}} \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\% \text{ Pasa} = 100\% - \% \text{ Retenido}_{\text{Acumulado}} \quad \text{Ecuación 14}$$

4.2.4. Límites de Atterberg:

Se aplicó la normativa INEN 0691 para la evaluación del límite líquido, así como la normativa INEN 0682 para la determinación del límite plástico. Para la preparación del material, se tomó material suficiente para obtener aproximadamente 500 g de material que pase por tamiz No. 40.

4.2.4.1. Procedimiento límite líquido:

Inicialmente se mezcla una cantidad aproximada de 250 g de muestra de suelo que haya pasado por el tamiz No. 40 con agua; utilizando una espátula, hasta lograr la formación de una pasta uniforme y moldeable. Esta pasta se coloca y enrasta en la Cuchara de Casagrande hasta alcanzar una altura de 1 cm. Luego, se realiza un canal utilizando un acanalador, dividiendo la pasta en dos partes. Posteriormente, se gira la manivela de la Cuchara de Casagrande a una frecuencia de 2 revoluciones por segundo. Se cuentan los golpes necesarios para que las dos mitades de la muestra se unan formando un canal continuo de alrededor de 13 mm de distancia. Este número de golpes, en el primer ensayo, debe situarse entre 35 y 45; de lo contrario, se ajusta la cantidad de agua añadida o se deja secar la muestra al aire. Se toma luego una muestra de suelo de aproximadamente 10 g del punto donde se unen los bordes para determinar la humedad, la humedad se calcula siguiendo el mismo procedimiento descrito en granulometría. Este proceso se repite cuatro veces, variando la humedad y mezclando durante 5 minutos (INEN, 1982).

4.2.5. Procedimiento límite plástico:

Se mezcla el suelo que pase por el tamiz No. 4 con agua; a través de una pipeta de plástico, hasta lograr una masa moldeable. Se toma una muestra del suelo preparado y se amasa manualmente hasta formar una masa homogénea, utilizando las manos para secarla gradualmente durante el proceso. Esta masa se moldea en cilindros de aproximadamente 3 mm de diámetro. Hasta que se observa el punto en que los cilindros comienzan a agrietarse o desmoronarse. Una vez alcanzada esta condición, se recogen los cilindros desmoronados y se obtiene la humedad (INEN, 1982).

4.2.6. Resistividad eléctrica

Para la clasificación del suelo se realizaron perfiles de tomografía eléctrica, siguiendo el procedimiento que se indica en la sección a continuación:

4.2.6.1. Procedimiento para tomografía eléctrica

Se ejecutaron perfiles de tomografía eléctrica en dos sitios, establecidos a través de inspecciones de campo.

Para el inicio de la tomografía eléctrica se realizaron los siguientes pasos:

Con el equipo apagado, se conectaron los cables al resistivímetro y se desplegaron a lo largo de la línea seleccionada. A intervalos de 5 metros, se colocaron las picas, las cuales se conectaron a los electrodos. Las picas no deben necesariamente estar completamente hundidas, sino lo suficiente para mantenerse estables.

Luego de instalar las picas y electrodos, se verifica su correcta colocación mediante una prueba en el equipo, asegurando que los electrodos transmitan datos de manera adecuada. Tras esta comprobación, se inicia el equipo y se procede a la recopilación de datos, los cuales se registran y almacenan en una computadora para su posterior análisis, antes de retirar las picas, se colocan las estacas de madera, para obtener posteriormente los datos topográficos.

En el ensayo de resistividad eléctrica, se eligió procesar los datos mediante el software RES2DINV, que emplea un proceso de inversión para generar un modelo bidimensional de la estructura del suelo a estudiar, usando el arreglo de electrodos DIPOLO-DIPOLO.

Equipo

- Resistivímetro marca IRIS, modelo Syscal Pro. Switch 4
- Batería externa
- Cables para perfilaje geo eléctrico
- Barras de acero con punta (picas)
- Electrodos
- Estacas de madera



Figura 10. Resistivímetro usado para el estudio. Fuente: Elaboración propia

El resistivímetro usado para realizar las tomografías eléctricas se puede observar en la Figura 10.

4.2.6.2. Clasificación del suelo mediante su resistividad eléctrica

Para la clasificación del suelo mediante su resistividad eléctrica, se utilizó la Tabla 5 basada en un estudio específico de la zona de interés realizado por Flores Ramírez (2024). Este estudio estableció rangos de resistividad eléctrica para diferentes tipos de suelos. La investigación del estudio citado se complementó con estudios que permitieron conocer la estratigrafía del terreno, llegando a la conclusión que los valores presentados en la Tabla 5 eran coherentes con lo observado en la zona. Además, se compararon los valores de la Tabla 5 con los valores de la Tabla 4, para tener en cuenta si existe correlación entre estas dos tablas.

Con la obtención de las tomografías eléctricas y la clasificación de los suelos según su resistividad eléctrica, se realizó un perfil de estratigrafía para cada resultado.

4.3. Evaluación de movimientos de masa

Para realizar la evaluación del cambio respecto al tiempo en los movimientos de masa identificados, se realizó una fotointerpretación, la cual consiste en comparar dos fotos del mismo sitio y observar los cambios que han ocurrido durante el paso del tiempo.

Para realizar este análisis, es importante definir las áreas de estudio en relación con el flujo de agua en el canal; la parte superior se encuentra a la izquierda del canal y la parte inferior a la derecha del canal, siempre en sentido del flujo

Para realizar la evaluación, se tomaron en cuenta dos aspectos principales: la cobertura vegetal y el estado del movimiento de masa, los cuales son fácilmente observables en las fotografías. La comparación se realizó en orden cronológico a lo largo de diferentes años.

Aspectos a Considerar

- Cobertura Vegetal:

Se comparó la densidad y distribución de la vegetación.

- Estado del movimiento de masa:

Se identificó signos de la actividad de los movimientos de masa: comparando la extensión activación del movimiento o su inactivación en diferentes años.

4.4. Generación de mapas

4.4.1. Delimitación de la microcuenca

Este proceso se realizó con el fin de analizar la influencia de caminos preferenciales de agua, que se han generado con el tiempo en los movimientos de masas. Para la delimitación de estas microcuencas se empleó el método semiautomático con el software ArcGIS para delimitar y representar de manera más precisa las microcuencas presentes en la parte baja del tramo de Labrado - Tuñi.

- **Modelo digital de elevación:** Partiendo de la información correspondiente a las curvas de nivel de la cuenca del Machángara y empleando las herramientas TIN y Ráster en el software ArcGIS, se elaboró un modelo digital de la elevación del terreno (DEM) de toda la cuenca del Machángara.
- **Dirección de Flujo:** A partir del modelo de elevación digital (DEM), se procedió a determinar la dirección del flujo de agua basándose en las pendientes del terreno, para determinar esta dirección se empleó la herramienta Flow Direction en el software ArcGIS.
- **Acumulación de Flujo:** Identificada la dirección del flujo, se procede con la determinación del flujo acumulado, para elaborar esta nueva información en el software ArcGIS se empleó la herramienta Flow Accumulation. Con esto se puede identificar los cursos de agua más representativos que van a estar representados de un color azul más oscuro.
- **Enlaces de transmisión:** Con la información de acumulación de flujo se identificó la red de drenaje principal de la cuenca del Machángara, para apreciar las microcuenca en la parte baja de la conducción de Labrado – Tuñi se empleó un condicional para diferenciar los demás cursos de agua. En el software ArcGIS se empleó la herramienta Con. En esta herramienta, a partir de la capa ráster de flujo acumulado se visualiza los flujos de agua de acuerdo a un condicional; el condicional fue iterado hasta llegar a observar los demás cursos de agua de la cuenca del Machángara.
- **Watershed:** Una vez identificado los cursos de agua, se delimitaron las microcuenca existentes por medio del software ArcGIS; para este proceso se realizó una nueva capa shapefile de tipo punto, la misma que se ubicó en las intersecciones de los caminos preferenciales del agua. A partir de la información de la intersección de los caminos de agua preferenciales y la dirección del flujo, se utilizó la herramienta Watershed para generar las áreas correspondientes a las microcuenca existentes en la zona de estudio.

En la Figura 11 se pueden observar el proceso descrito en los párrafos anteriores para la delimitación de las microcuenca en la zona de estudio.

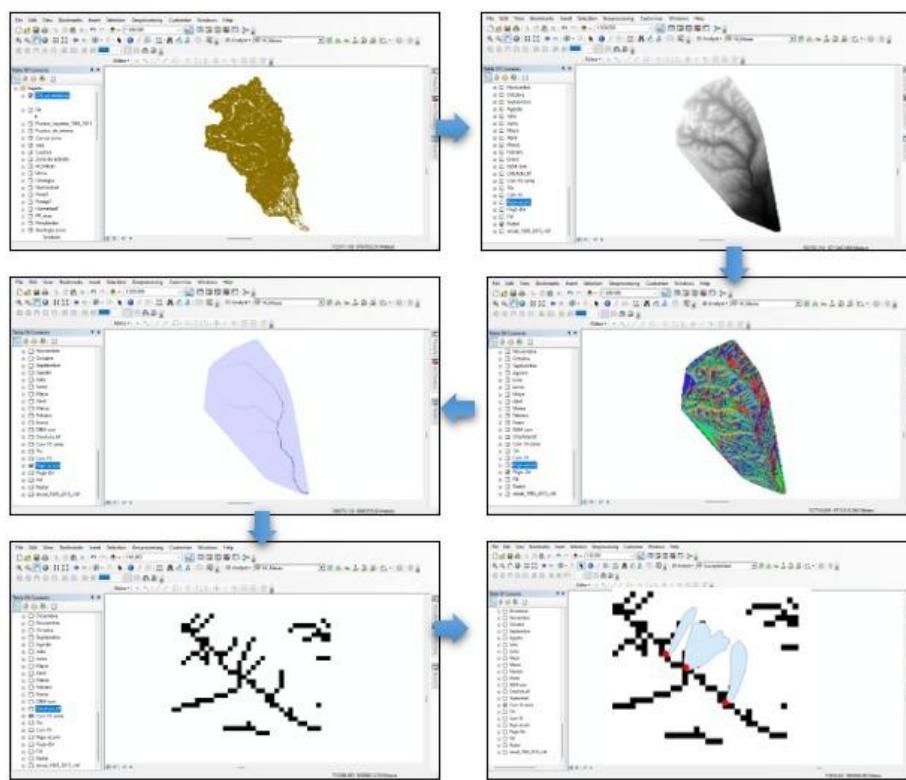


Figura 11 Proceso para la delimitación de las microcuenca en la parte baja de la conducción Labrado – Tuñi.
Fuente: Elaboración propia

4.4.2. Determinación de amenaza por deslizamiento

A partir de la información recopilada de fuentes externas y la obtenida por medio de las visitas de campo, se realizaron los mapas de los parámetros de: litología, precipitación, pendientes, humedades, cobertura vegetal y sismicidad. Posteriormente, usando la metodología de Mora & Varhson, con ayuda del software ArcGIS se generó una combinación de estos mapas para determinar la susceptibilidad de la parte baja de la conducción de Labrado – Tuñi.

4.4.2.1. Elaboración del mapa del factor de pendientes (S_p)

Con la información de las curvas de nivel se utilizaron las siguientes herramientas:

- Create TIN: para elaborar un modelo 3D del terreno.
- To ráster: para crear en formato ráster una nueva capa con la información correspondiente a las pendientes del terreno (DEM).
- Slope: que a partir del DEM generado, crea el mapa de pendientes.
- Reclassify: para clasificar las pendientes de acuerdo a la Tabla 7, donde se considera las condiciones del terreno y se asigna un valor del factor de pendiente (S_p).

4.4.2.2. Elaboración del mapa del factor litológico (SL)

Con la información correspondiente a las hojas geológicas de Cuenca y Gualleturo y, con las observaciones del estado de las rocas presentes en la zona de estudio se clasificó la geología en la parte baja de la conducción Labrado – Tuñi según la Tabla 8, en esta tabla

se muestran las diferentes litologías y los grados de alteración, correlacionados a un factor de litología. Además, con la identificación de movimientos de masas presentes en la zona de estudio se empleó el software Google Earth, para determinar el área de cada unidad geológica y el área de movimientos de masa, a partir de esta información se empleó las ecuaciones 8, 9 y 10 para obtener el valor del factor litológico de los movimientos de masa.

Identificado las ponderaciones para las unidades geológicas y los movimientos de masa registrados, se cargaron los datos al software ArcGIS, para generar un archivo ráster que represente la litología de la zona de estudio y posteriormente asignar los valores a cada zona para general el mapa del factor litológico.

4.4.2.3. Elaboración del mapa del factor de humedad (SH)

A partir del promedio de las precipitaciones mensuales desde el año 1985 hasta el año 2015, de la estación de EL Labrado, y de los valores de evapotranspiración de la zona de Labrado mostrados en la Tabla 19, se obtuvo el valor de la humedad de manera indirecta mediante la resta de estos dos valores.

También se obtuvo el valor de humedad, con datos diarios volumétricos del contenido de agua en el suelo de la misma estación proporcionados por Etapa del año 2015 y 2017, con esta información se obtuvo la lámina de agua de cada día y se promedió estos valores para obtener el valor mensual de humedad en el suelo. Posteriormente se compararon estos dos valores, para observar si están correlacionados.

Con la información de la humedad, se empleó el software ArcGIS para reclasificar los valores de acuerdo a la Tabla 9 para todos los meses, esta tabla asigna un valor de peso a la humedad para cada mes. Con todos los meses clasificados se realizó una suma de las ponderaciones y se otorgó una valoración del parámetro de humedad de acuerdo a la Tabla 10. La ubicación de la estación de El Labrado y de la estación de Chanlud se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18 Nombre, código y ubicación de las estaciones meteorológicas empleadas en el estudio

Nombre de la Estación	Código	Ubicación UTM WGS84 Zona 17M	
		E	N
Chanlud	M1111	718862.884 m	9703970.073 m
El Labrado	M0141	714218.879 m	9697771.826 m

Fuente: Modificado de la información del INAMHI

Tabla 19 Datos de la evapotranspiración potencial en la zona de Labrado

Estación	Evapotranspiración potencial media mensual (mm/mes)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Labrado	50.03	49.37	49.39	49.3	48.17	43.69	40.63	41.02	44.2	48.66	50.98	50.32

Fuente: Modificado de (Carchi, 2015)

4.4.2.4. Elaboración del mapa del factor de cobertura vegetal (SC)

La cobertura vegetal, se obtuvo mediante el mapa de cobertura vegetal del Ministerio de Agricultura y Ganadería, y se modificó según observaciones realizadas durante las visitas de campo. Conociendo el tipo de vegetación, el grado de alteración (según el Ministerio de Agricultura y Ganadería) y las áreas con movimientos de masas, se procedió a valorar cada

zona de acuerdo con la Tabla 11. Posteriormente, se cargó esta información en el software ArcGIS para generar un archivo ráster que represente el mapa del factor de cobertura vegetal.

4.4.2.5. Elaboración del mapa del factor de disparo por lluvia (D_{LL})

A partir de los registros diarios de lluvias de las estaciones meteorológicas de El Labrado y Chanlud, y considerando que estos registros abarcan menos de 10 años, se estimó la precipitación máxima durante este periodo mediante un promedio aritmético. Para aproximar la precipitación en la zona de estudio, se ponderaron las precipitaciones máximas registradas en ambas estaciones. Se cargó esta información en el software ArcGIS y se clasificó de acuerdo a la Tabla 12, donde se asigna el factor (D_{LL}) según la precipitación diaria máxima registrada y con esto se generó el mapa correspondiente al factor de disparo por lluvia.

4.4.2.6. Elaboración del mapa del factor de disparo por sismicidad (D_s)

La información obtenida del mapa sísmico, de la Norma Ecuatoria de la Construcción, mostrado en la Figura 12 , sirvió como referencia para determinar la clasificación de acuerdo a los valores de PGA de la Tabla 13. En el software ArcGIS, con esta clasificación se determinó el valor del factor de disparo por sismicidad a aplicar en el método de Mora & Varhson.

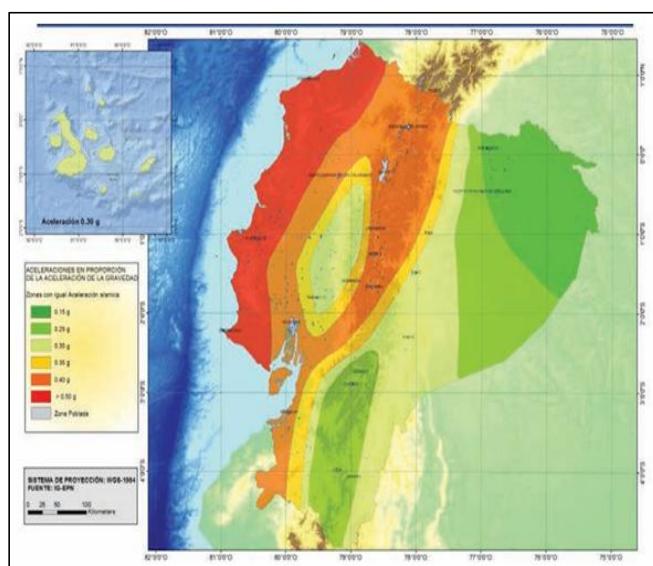


Figura 12 Mapa sísmico de Ecuador. Fuente: modificado de (NEC-SE-DS, 2015)

4.4.2.7. Elaboración del mapa de susceptibilidad

Elaborado los mapas de los factores de: pendiente, litología, cobertura vegetal, humedad, lluvia y sismicidad, se procedió con la combinación de los mismos por medio del método Mora & Varhson, en el cual se emplea la ecuación 7. Para esta combinación se utilizó la herramienta Ráster Calculator del software ArcGIS; en donde se puede realizar operaciones matemáticas (suma, resta, multiplicación y división) en los mapas creados en el mismo software. Por medio de esta herramienta se creó el mapa de susceptibilidad de la zona baja de la conducción Labrado – Tuñi.

4.5. Propuesta de planes de mitigación

Para realizar la propuesta de planes de mitigación de prevención de movimientos de masa en el área de estudio, se llevó a cabo una búsqueda de bibliografía en diferentes bases de datos mediante el uso de palabras claves y operadores booleanos que facilitaron la obtención de la información requerida. De esta manera, se pudo caracterizar cada alternativa para la consideración de estas como una línea base para su posterior aplicación. Se establecieron propuestas que no alteren las condiciones de la zona; como la cobertura vegetal.

5. Resultados y discusión

5.1. Recolección de información

5.1.1. Geología

Durante las exploraciones en campo, se observaron diversos materiales geológicos a lo largo de la parte baja de la conducción Labrado – Tuñi, sin la interferencia de la capa vegetal. Entre estos, se lograron identificar los siguientes: Toba, Andesita y Basalto; pertenecientes a la Formación Célica y Formación Tarqui, y también se identificaron depósitos coluviales.

- **Toba:** Este material geológico se observó en los márgenes de la vía. Presenta una textura granular y una alteración en la coloración de la roca, como se puede observar en la Figura 13.

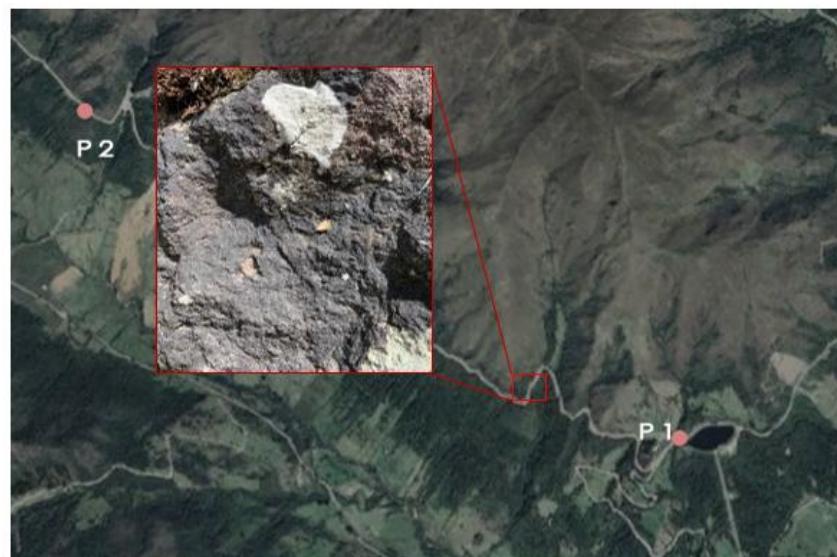


Figura 13 Roca Toba cristalina identificada en la parte baja de la conducción Labrado - Tuñi. Fuente: Modificado de Google Earth

- **Coluvial:** Este material se encuentra principalmente en las quebradas a lo largo de la vía, tanto en la parte superior como en la inferior. Está compuesto por bloques de material granular grueso y fino, como se observa en la Figura 14 y la Figura 15.



Figura 14 Material coluvial identificado en una de las quebradas a lo largo de la vía Labrado – Tuñi. Fuente: Modificado de Google Earth



Figura 15 Material coluvial identificado en la parte baja de la conducción de Labrado – Tuñi. Fuente: Modificado de Google Earth

- **Andesita:** Este material se encontró al inicio del recorrido desde Tuñi hacia Labrado. Presenta una textura lisa, alteraciones en su color y fracturas, como se puede observar en la Figura 16.



Figura 16 Roca andesita identificada en la parte baja de la conducción de Labrado – Tuñi. Fuente: Modificado de Google Earth

- **Basalto:** Este material se encontró en la zona de la primera quebrada desde Tuñi hacia Labrado. Presenta una textura corrugada, alteraciones en su color y fracturas, como se puede observar en la Figura 17.



Figura 17. Basalto identificado en la parte baja de la conducción de Labrado – Tuñi. Fuente: Modificado de Google Earth

5.1.2. Precipitaciones

De acuerdo a los resultados de las precipitaciones promedio mensuales desde el año 1985 hasta el año 2015 de la estación El Labrado, que se muestran en la Tabla 20 y la Tabla 21, Los meses con las precipitaciones más altas son marzo y abril, mientras que agosto es el mes con las precipitaciones más bajas.

Tabla 20 Estación El Labrado y sus precipitaciones promedio mensuales, desde el año 1985 hasta el año 2015. Meses desde enero a junio.

Estación	Ubicación UTM WGS84 Zona 17M		Precipitación (mm/mes)					
			Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun
	E	N						
EL LABRADO	714218.879 m	9697771.826 m	129.91	155.17	178.72	171.06	164.06	136.55

Fuente: Elaboración propia con información recolectada del INAMHI.

Tabla 21. Estación El Labrado y sus las precipitaciones promedio mensuales, desde el año 1985 hasta el año 2015. Meses desde julio hasta diciembre.

Estación	Ubicación UTM WGS84 Zona 17M		Precipitación (mm/mes)					
			Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
	E	N						
EL LABRADO	714218.879 m	9697771.826 m	96.5	74.54	91.99	119.23	103.79	99

Fuente: Elaboración propia con información recolectada del INAMHI.

Con la información de precipitaciones diarias de la estación de Chanlud, se realizó un gráfico teniendo como resultado la Figura 18; donde se muestran las mediciones de la lluvia desde el año 2014 al año 2019. Además, se realizó el mismo gráfico, pero con la información de la estación de EL Labrado desde el año 2015 al año 2017, este gráfico se muestra en la Figura 19.

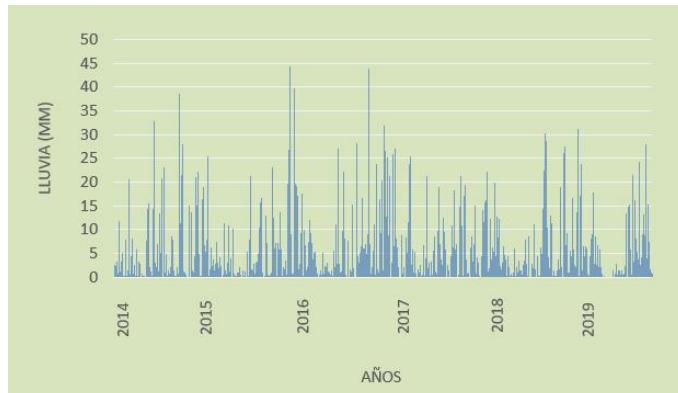


Figura 18 Precipitaciones diarias en la zona de estudio de la estación Chanlud. Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por el PROMAS de la Universidad de Cuenca

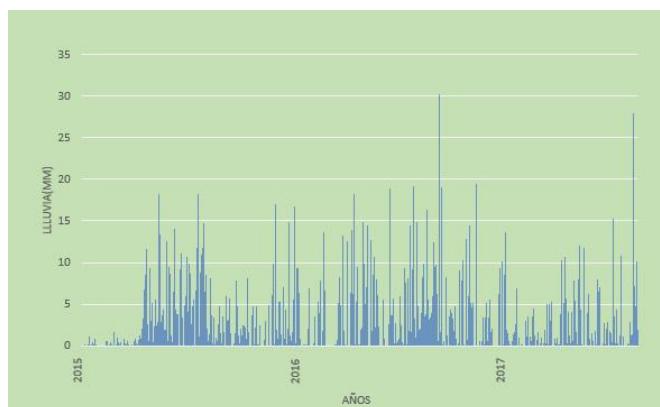


Figura 19 Precipitaciones diarias en la zona de estudio de la estación El Labrado. Fuente: Elaboración propia con información proporcionada por ETAPA.

Los resultados de la Figura 18 y la Figura 19 revelaron que las precipitaciones máximas diarias ocurrieron entre 2015 y 2017, con valores que oscilaron entre 30 mm/día y 43 mm/día.

5.2. Identificación de movimientos de masa

Se lograron identificar al menos 3 movimientos de masa que han ocurrido en el tramo de la parte baja de la conducción Labrado – Tuñi. Las ubicaciones de los movimientos de masa observados se muestran en la Tabla 22; el abscisado que se muestra en esta tabla va en dirección de Tuñi hacia Labrado. De la Tabla 22 el movimiento de masa en la abscisa 2+500 Km se lo denominó como movimiento de masa 1, el cual se encuentra en la parte superior del canal como se observa en la Figura 20; el movimiento de masa que se encuentra en la abscisa 2+250 Km en la parte inferior del canal se lo denominó como movimiento de masa 2 y se puede observar en la Figura 21 y se denominó como movimiento de masa 3 al movimiento que se encuentra en la abscisa 1+400 Km, en la parte inferior del canal, este movimiento se muestra en la Figura 22.

Tabla 22. Ubicación de los movimientos de masa identificados en la parte baja de la conducción Labrado - Tuñi

Movimiento de masa	Ubicación UTM WGS84 Zona 17M		Abscisa (Km)
	E	N	
1	718451.19 m	9697423.10 m	2+500
2	718488.72 m	9697081.96 m	2+250
3	719078.69 m	9696755.83 m	1+400

Fuente: Elaboración propia



Figura 20. Movimiento de masa 1 observado por medio de un dron, en la zona de una quebrada. Fuente: Elaboración propia



Figura 21. Movimiento de masa 2 observado mediante visitas de campo. Fuente: Elaboración propia

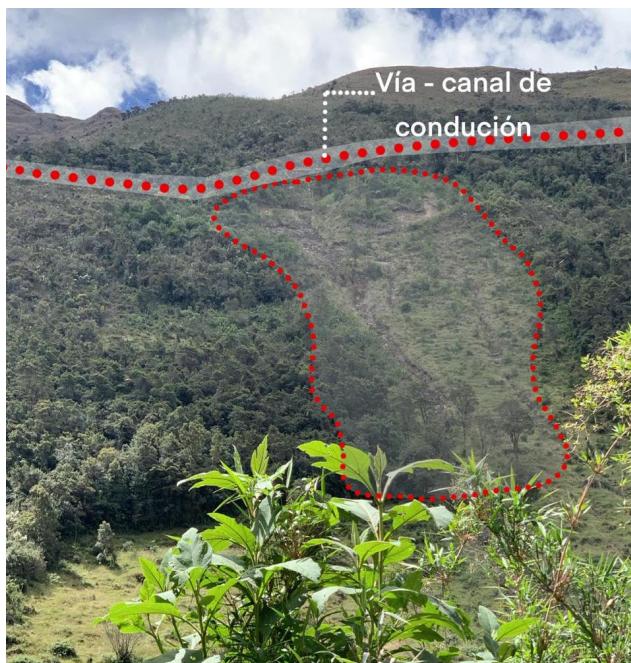


Figura 22. Movimiento de masa 3 observado mediante visitas de campo. Fuente: Elaboración propia

Estos movimientos de masa se podrían clasificar según la Tabla 2; donde se clasifican los movimientos de masa según sus características. En los tres movimientos de masa, se podría decir que siguen las características de un flujo de detritos, debido al arrastre visible de materiales de diversos tamaños.

5.3. Puntos para la caracterización del suelo

Para definir los puntos de caracterización del suelo, se identificaron y evaluaron las condiciones del terreno mediante inspecciones en campo. Estas inspecciones detectaron signos de movimientos de masa, cambios en el tipo de suelo y áreas con variaciones en la

cobertura vegetal. A continuación, se presentan los puntos seleccionados para los ensayos de laboratorio (granulometría y límites de Atterberg) y para las tomografías eléctricas.

5.3.1. Puntos para ensayos de laboratorio

Para determinar los sitios de muestreo, se identificaron cambios en el tipo de suelo y áreas con deslizamientos de material mediante las inspecciones de campo. Con estas inspecciones en el área de estudio, se recogieron cuatro muestras en las zonas donde se observaron variaciones en las características del suelo.

En la Tabla 23, se muestran las ubicaciones de los puntos para los ensayos de granulometría y límites de Atterberg. En la Figura 23 se muestra la ubicación de los puntos de extracción de las muestras.

A continuación, se describe las características de las muestras recolectadas:

- Muestra M1: Esta muestra se tomó a menos de dos metros del canal de conducción, donde se vio un pequeño deslizamiento de tierra. La zona donde se recolectó esta muestra contaba con cobertura vegetal.
- Muestra M2: La muestra se tomó al lado derecho de una quebrada, en la parte baja de un talud donde se habían presentado movimientos de masa. La zona de este talud no tenía cobertura vegetal.
- Muestra M3: La muestra se tomó cerca de la vía, donde Elecausto había intervenido para la colocación de muros de contención, en un área con antecedentes de movimientos de masa. Esta zona contaba con una capa de cobertura vegetal.
- Muestra M4: La muestra se tomó cerca de la vía, donde se observó un posible desgaste de una roca arcillosa, esta zona no tenía cobertura vegetal.

La excavación para las cuatro muestras fue superficial.

Tabla 23 Resumen de información de muestras para los ensayos de laboratorio.

Muestra	Lugar de excavación	Ubicación UTM WGS84 Zona 17M	
		E	N
M1	Pie de talud al lado de la vía	719116.982 m	9696833.082 m
M2	Parte media del talud	718450.673 m	9697430.079 m
M3	Pie de talud al lado de la vía	718092.617 m	9697599.659 m
M4	Pie de talud al lado de la vía	719089.239 m	9696869.957 m

Fuente: Elaboración propia.



Figura 23. Puntos de muestra. Fuente: Modificado de Google Earth.

5.3.2. Puntos para resistividad eléctrica

Los puntos para medir la resistividad eléctrica se establecieron cerca de dos quebradas. La primera se denominó quebrada Q1, donde también se tomó la muestra M2; este punto fue seleccionado debido a la presencia de un talud con antecedentes de movimientos de masa. La línea de prospección se trazó aproximadamente en el centro del talud, paralelo a este, comenzando en la quebrada Q1 y extendiéndose hasta la parte alta del talud, la línea de prospección que se realizó en esta zona se muestra en la Figura 24 con una línea de color amarillo.

La segunda quebrada, fue nombrada como quebrada Q2. Esta quebrada se eligió porque su caudal no era significativo y porque, al lado derecho de la misma, había un pastizal con evidencia de una posible intervención humana. La línea de prospección se trazó en esta zona de pastizal, paralela a esta quebrada, como se muestra en la Figura 25.

En la Tabla 24, se muestran las ubicaciones de estas dos quebradas.

Tabla 24. Puntos de referencia para resistividad eléctrica.

Nombre	Ubicación UTM WGS84 Zona 17M	
	E	N
Quebrada Q1	718438.324 m	9697427.113 m
Quebrada Q2	719728.302 m	9696613.863 m

Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. Tramo en la zona de la quebrada Q1, para el estudio de resistividad eléctrica. Fuente: Modificado de Google Earth.



Figura 25. Tramo en la zona de la quebrada Q2, para el estudio de resistividad eléctrica. Fuente: Modificado de Google Earth.

5.4. Caracterización del suelo

Esta caracterización se realizó a través de ensayos de granulometría, límites de Atterberg y por medio de clasificación del suelo según su resistividad eléctrica.

5.4.1. Ensayos de laboratorio

Antes de realizar los ensayos de granulometría y límites de Atterberg se determinó la humedad de las muestras:

En la Tabla 25 se observan los datos de humedad de cada tara, correspondiendo a la siguiente nomenclatura, ejemplo: primera tara de la muestra M1 (T.M1) y segunda tara de la muestra M1 (T.M1.1). Por otro lado, en la Tabla 26, se puede observar el promedio de la humedad de campo de cada muestra. El resultado mostró que la muestra M1 tenía la humedad más alta.

Tabla 25. Resultados del ensayo de humedad, de las muestras estudiadas.

Tara	Peso Tara (g)	P. Tara + Suelo Húmedo (g)	P. Tara + Suelo Seco (g)	Suelo Húmedo (g)	Suelo Seco (g)	Humedad
T.M1	44.3	68.9	63	24.6	18.7	32%
T.M1.1	44.9	73.8	67.3	28.9	22.4	29%
T.M2	40	75.6	67	35.6	27	32%
T.M2.1	43	80	73.2	37	30.2	23%
T.M3	50.1	143.6	130.2	93.5	80.1	17%
T.M3.1	41.9	102	93.2	60.1	51.3	17%
T.M4	43.9	88	79.2	44.1	35.3	25%
T.M4.1	48.9	90	81.8	41.1	32.9	25%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Humedad promedio de las muestras estudiadas.

Muestra	Humedad promedio
M1	30%
M2	27%
M3	17%
M4	25%

Fuente: Elaboración propia.

- **Granulometría y límites de Atterberg**

Para el inicio del ensayo de granulometría fue necesario definir el tamaño mínimo de muestra; los tamaños de muestra usados se observan en la Tabla 27.

Tabla 27. Tamaño de muestra utilizados para el ensayo de granulometría.

Muestra	Tamaño de muestra(g)
M1	4105
M2	4125
M3	4087
M4	3230

Fuente: Elaboración propia.

Con los resultados del estudio de granulometría contemplados en la Tabla 28 se puede concluir que la zona estudiada está compuesta en su mayoría por grava de manera superficial.

Tabla 28. Resumen de resultados de granulometría y límites de Atterberg.

Muestra	Ubicación	% Grava	% Arena	% Finos	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad	Clasificación SUCS
M1	Pie de talud	62.26	35.51	2.23	37.18%	30.01%	7.08%	GP (Grava mal gradada)
M2	Parte media del talud	74.45	23.32	2.23	41.00%	34.50%	6.50%	GW (Grava bien gradada)
M3	Pie de talud	50.66	48.58	0.76	28.90%	20.00%	8.90%	GP (Grava mal gradada)
M4	Pie de talud	66.44	32.76	0.6	30.76%	23.10%	7.66%	GW (Grava bien gradada)

Fuente: Elaboración propia

La susceptibilidad de los taludes podría estar influenciada por la granulometría y la plasticidad del material. En general, los suelos con altos contenidos de grava y bajos contenidos de finos y plasticidad tienden a ser más estables debido a una mayor fricción interna y una menor capacidad de retención de agua (Braja, 2015).

Todas las muestras tomadas indican una presencia significativa de grava con baja cantidad de finos y arena, lo cual sugiere un material con buena estabilidad (Braja, 2015) . Sin embargo, la mala gradación de algunos de estos materiales puede reducir la cohesión interna, lo que podría provocar susceptibilidad a movimientos si el talud se satura de agua.

- Resistividad eléctrica de las dos quebradas de interés

Luego de revisar la Tabla 4 y la Tabla 5, se pudo establecer que el estudio realizado por Flores Ramírez (2024), tiene concordancia con valores comunes de resistividad para diferentes materiales, por lo que a continuación se muestra la interpretación de las tomografías eléctricas de la Figura 26 y la Figura 27, posteriormente se presenta la clasificación del suelo según la Tabla 5, esta tabla relaciona el tipo de suelo con su resistividad eléctrica.

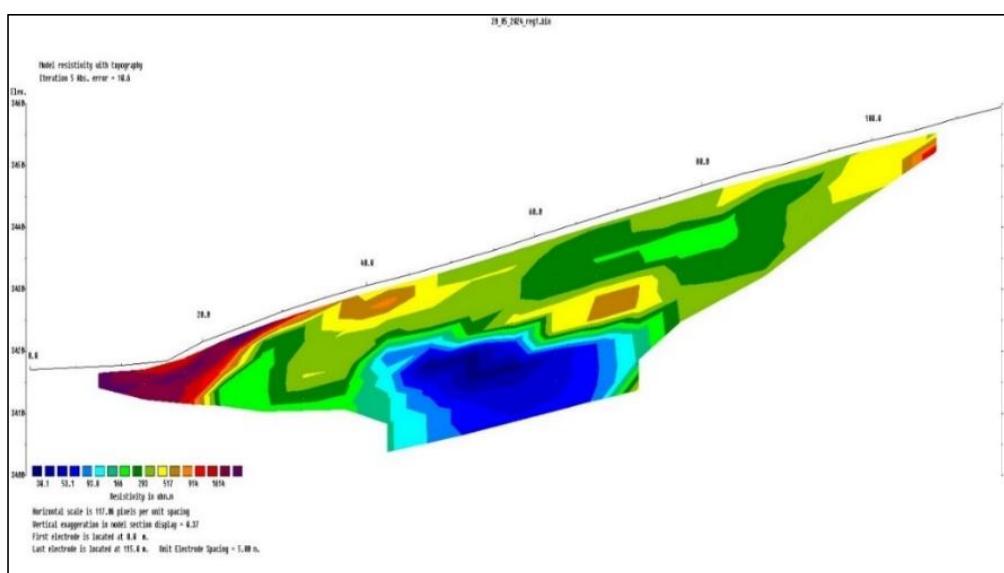


Figura 26. Resultado de la tomografía eléctrica por inversión en la zona de la quebrada Q1. Fuente: Elaboración propia.

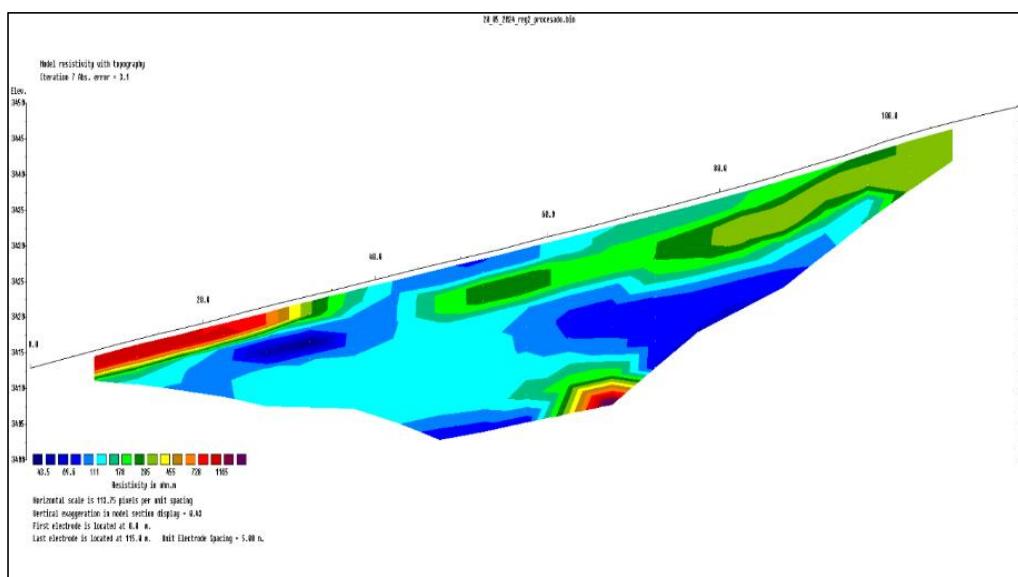


Figura 27. Resultado de la tomografía eléctrica por inversión en la zona de la quebrada Q2. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 26 y la Figura 27 se muestran las tomografías eléctricas a lo largo de un talud lateral a la quebrada Q1 y a lo largo de un talud paralelo a la quebrada Q2 respectivamente. La zona de alta resistividad se muestra de color rojo y naranja, la zona de resistividad media de color verde y amarillo y, por último, la zona de baja resistividad de color azul y cian.

Nota: Las zonas de alta a baja resistividad, es una clasificación de acuerdo a cada tomografía eléctrica, no es una clasificación general.

Clasificación de suelos respecto a la Tabla 5:

Talud de la zona de la quebrada Q1:

- Alta resistividad (914 - 1614 ohm·m): Grava arcillosa, grava limosa con arena.
- Resistividad media (293 - 517 ohm·m): Combinaciones de grava limosa y arena arcillosa.
- Baja resistividad (30.1 - 166 ohm·m): Arcillas de alta plasticidad con arena, limos de baja plasticidad, arenas limosas.

Talud de la zona de la quebrada Q2:

- Alta resistividad (728 - 1165 ohm·m): Grava arcillosa, grava limosa con arena.
- Resistividad media (178 - 455 ohm·m): Combinaciones de grava limosa y arena arcillosa.
- Baja resistividad (43.5 - 111 ohm·m): Arcillas de alta plasticidad con arena, limos de baja plasticidad.

A continuación se muestran los perfiles estratigráficos en el centro de los dos taludes.

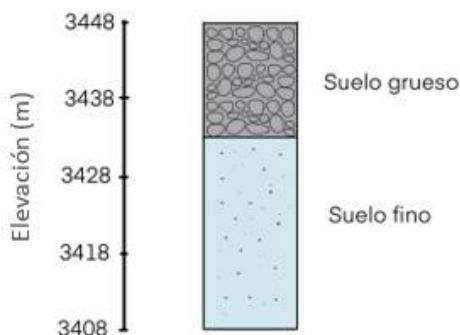


Figura 28. Perfil estratigráfico del talud de la zona de la quebrada Q1, en la zona media del talud. Fuente: Elaboración propia.

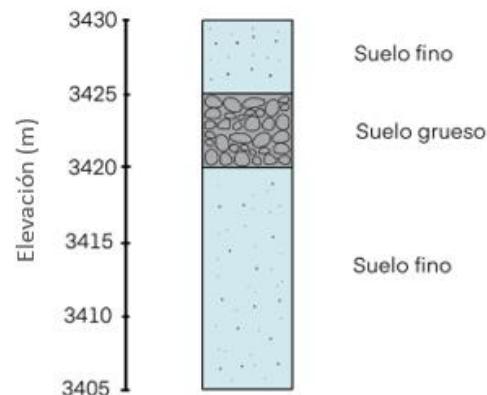


Figura 29. Perfil estratigráfico del talud de la zona de la quebrada Q2, en la zona media del talud. Fuente: Elaboración propia.

Con base en los resultados de resistividad eléctrica, se puede inferir que las estratigrafías de los dos taludes están compuestas mayormente por un alto porcentaje de suelos finos, concentrados en los estratos inferiores, como se puede observar en la estratigrafía de los dos taludes en la Figura 28 y la Figura 29. Las resistividades bajas en el talud de la quebrada Q1 sugieren una posible presencia significativa de agua en estos estratos, lo cual podría indicar suelos finos con alta humedad. En cambio, en el talud de la quebrada Q2, a pesar de que los estratos inferiores también presentan suelos finos, la resistividad más alta sugiere una menor cantidad de agua en estos estratos en comparación con el talud de la quebrada Q1. Los estratos superiores de ambos taludes están principalmente compuestos por suelos gruesos como arenas y gravas, lo cual concuerda con los resultados de los ensayos de granulometría. Por otro lado, los estratos inferiores están compuestos principalmente por arcillas y limos. La menor presencia de agua en los estratos inferiores del talud de la quebrada Q2, que se observa comparando la Figura 26 y la Figura 27, puede deberse a la cobertura vegetal presente, que actúa como una barrera natural, reduciendo la infiltración de aguas lluvias hacia los estratos inferiores. En cambio, el talud de la quebrada Q1 carece de dicha cobertura, lo que podría facilitar la infiltración de agua y complicar la situación de estabilidad del talud. Además, la tomografía eléctrica del talud de la quebrada Q2 muestra un mayor porcentaje de suelos finos en comparación con el talud de la quebrada Q1. Esta diferencia en la composición y en la presencia de agua sugiere que el talud de la quebrada Q1 podría tener una mayor susceptibilidad a movimientos de masa debido a la mayor humedad en sus estratos inferiores y la ausencia de cobertura vegetal protectora. Con estos resultados, se puede observar que las propuestas de mitigación deberían enfocarse en prevenir la infiltración de agua hacia los estratos inferiores.

5.5. Evaluación de movimientos de masa

Una vez identificados los movimientos de masa, con fotografías de Google Earth de los años comprendidos desde el 2015 al año 2023 y una ortofoto por medio de un dron del año 2024, se procedió a realizar la evaluación de los siguientes movimientos de masa:

5.5.1. Evaluación para la zona de la quebrada Q1, zona del movimiento de masa 1

En la Figura 30 se puede observar el área delimitada de la quebrada Q1 que se usó como referencia para el análisis de las ortofotos. En la Figura 31 se puede observar la diferenciación de la quebrada, la vía y del movimiento de masas en el talud, esto para tener un mejor entendimiento de la ortofoto.

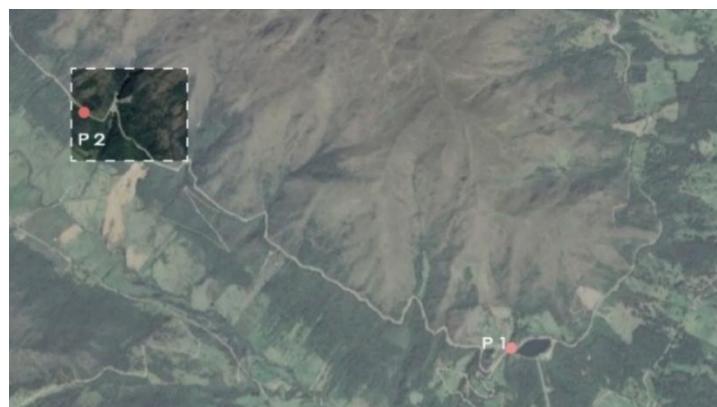


Figura 30. Delimitación del área para ortofotos de la zona de la quebrada Q1, donde se observa el movimiento de masa 1. Fuente: Modificado de Google Earth



Figura 31. Diferenciación de quebrada (color azul), movimiento de masa 1 (color rojo) y vía de la zona de estudio (color amarillo). Fuente: Modificado de Google Earth.

Durante las visitas de campo se identificaron dos problemas en la zona de la quebrada Q1: un movimiento de masa lateral (movimiento de masa 1) y la presencia de material predominantemente rocoso, resultado de un posible acarreo de materiales desde zonas superiores a la quebrada. Este último se evidenció en la ortofoto del área, donde se observa dicho material aguas arriba de la quebrada, como se muestra en la Figura 32. Permitiendo distinguir dos tipos de materiales: uno originado por el movimiento de masa 1, que se denomina con las siglas (MT) y otro por el acarreo de las zonas altas de la quebrada Q1, denominado con las siglas (MQ), tal como se aprecia en la Figura 33.



Figura 32. Material acarreado presente aguas arriba de la quebrada Q1. Fuente: Elaboración propia



Figura 33.Diferenciación de tipos de material en la zona de la quebrada Q1. Fuente: Elaboración propia

Comparación de las ortofotos

Con el análisis de las ortofotos se puede decir que, en la zona de la quebrada Q1 se han presentado problemas entre el año 2015 y 2017; comparando la Figura 34 y la Figura 35 donde se observan movimientos de masa en el lado derecho de la quebrada y acarreos de material desde la parte superior, en la Figura 35 correspondiente al año 2017 se puede observar un movimiento de masa al lado derecho de la quebrada, también un gran acarreo de material sobre la vía. En la Figura 36 correspondiente a la ortofoto del año 2022, se observó un incremento de tamaño en el movimiento de masa del lado derecho. Desde ese año, no se ha evidenciado un aumento en los movimientos de masa ni en el acarreo de material desde la parte superior de la quebrada. La comparación de las ortofotos del año 2024 que se puede observar en la Figura 37 y la ortofoto del año 2015 mostrada en la Figura 34, muestra que la cobertura vegetal, se ha perdido en la zona donde se dio el movimiento de masa 1 y no se ha recuperado, en las otras zonas cercanas a la quebrada, la cobertura vegetal no se ha visto alterada.

Es probable que los eventos de movimiento de masa y acarreo de material hayan sido provocados por lluvias intensas entre 2015 y 2017, como se corrobora en la Figura 18 y la Figura 19, donde se puede observar que los mayores eventos de precipitación son en ese periodo. Además, los movimientos de masa podrían haber sido influenciados por el terremoto ocurrido en Ecuador en 2016.

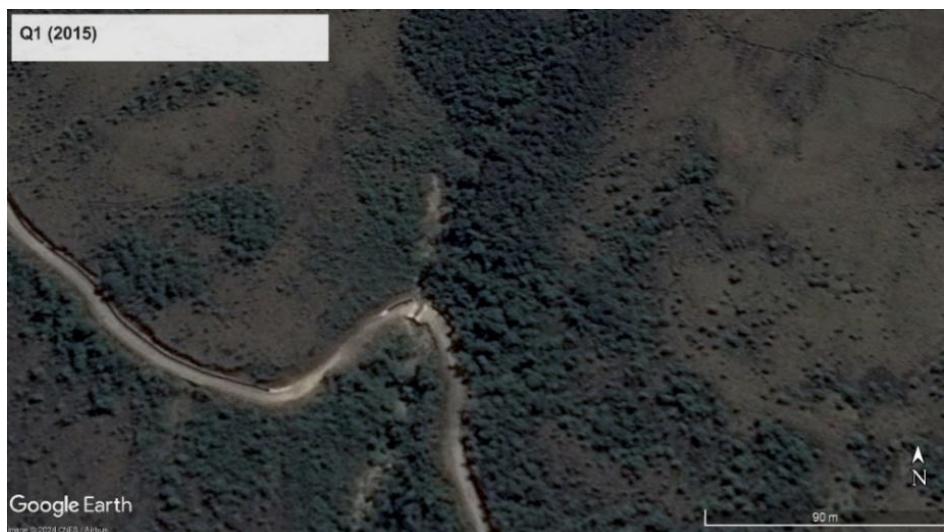


Figura 34. Ortofoto año 2015 movimiento de masa 1. Fuente: Modificado de Google Earth

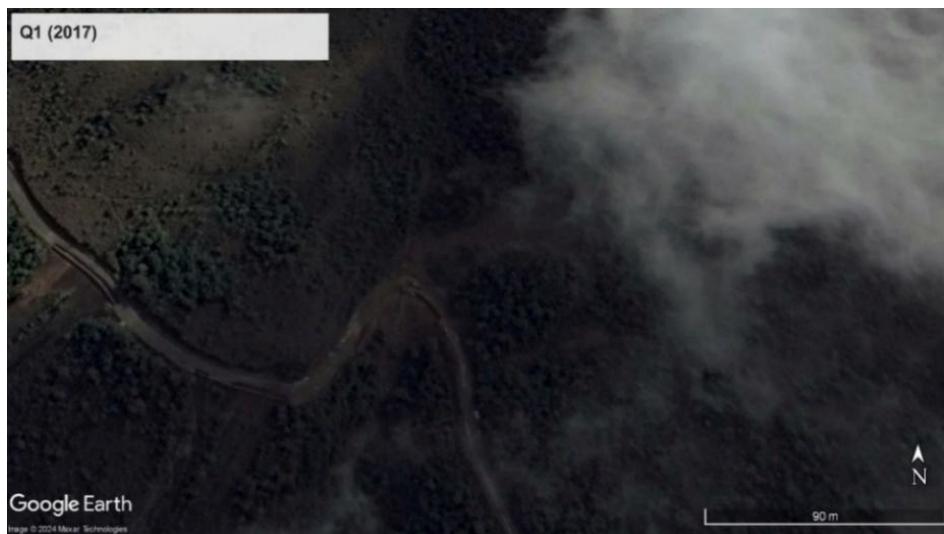


Figura 35. Ortofoto año 2017 movimiento de masa 1. Fuente: Modificado de Google Earth

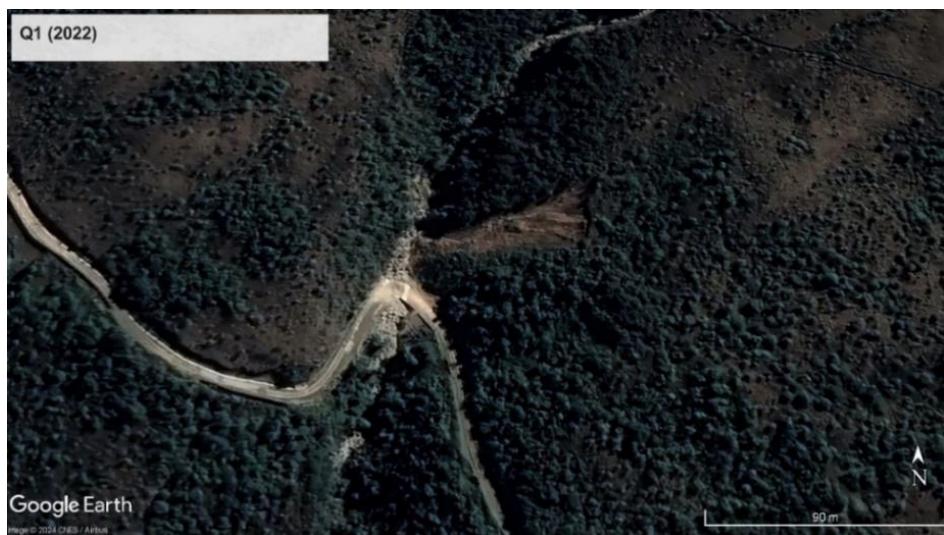


Figura 36. Ortofoto año 2022 movimiento de masa 1. Fuente: Modificado de Google Earth



Figura 37. Ortofoto año 2024 movimiento de masa 1. Fuente: Modificado de Google Earth

5.5.2. Para el movimiento de masa 2

Se observó que este movimiento de masa es significativamente mayor que el movimiento de masa 1 y ocurrió entre los años 2022 y 2023 como se puede observar comparando la Figura 38 y la Figura 39. Según la información recopilada durante las inspecciones de campo con el personal de Elecausto, en esta zona se produjo un taponamiento del canal de conducción debido al deslizamiento del talud de la quebrada Q1. Esto provocó una gran acumulación de agua en la zona, que fue redirigida hacia la parte inferior del canal, causando el movimiento de masa visible en la Figura 21. Esta información se corrobora con el análisis del movimiento de masa 1, debido a que en el año 2022 hubo una reactivación de este movimiento de masa, por lo que se podría decir que existe una correlación entre la activación del movimiento de masa 1 y la generación del movimiento de masa 2.



Figura 38. Estado del movimiento de masa 2 en el año 2022. Fuente: Modificado de Google Earth



Figura 39. Estado del movimiento de masa 2 en el año 2023. Fuente: Modificado de Google Earth.

5.6. Delimitación de las microcuenca

Las microcuenca delimitadas por medio del método semiautomático, concuerdan con las quebradas observadas en campo. Para diferenciar las microcuenca se las clasificó desde 1 hasta 3, en dirección desde Labrado hacia Tuñi. La microcuenca 1 se ubica en la quebrada Q1, la microcuenca 2 se ubica en las quebradas de Jatunguso y Rumishilla y la microcuenca 3 se ubica en la quebrada Q2. Las áreas delimitadas de estas microcuenca y las quebradas a las que aportan, se muestran en la Figura 40.

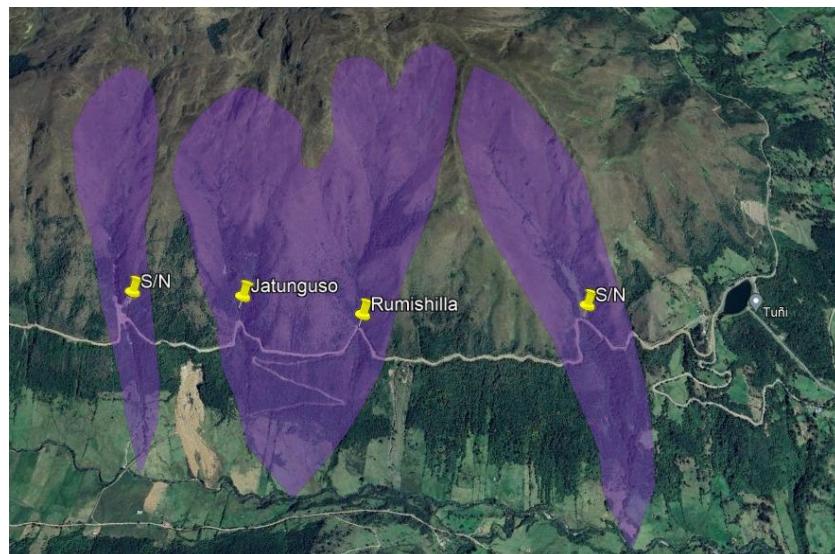


Figura 40 Ubicación de las microcuenca y las quebradas a las que pertenecen. Fuente: Modificado de Google Earth.

5.7. Análisis de los mapas de los factores utilizados en el método Mora & Varhson

5.7.1. Mapa del factor de pendiente

En la parte baja de la conducción se encontraron desde pendientes bajas hasta pendientes fuertes. Las pendientes de planicie, muy bajas, bajas y moderadas conforman alrededor del

17% de la zona de estudio y se ubican en la zona de inundación del cauce del río, por otro lado, las pendientes fuertes conforman el 67.25% de la zona de estudio, siendo éstas pendientes las que predominan; estas pendientes fuertes son las más susceptibles a generar movimientos de masas. El mapa del factor de pendientes se puede observar en la Figura 41. En la Tabla 29 se muestran los porcentajes de área para cada tipo de pendiente.

Tabla 29. Distribución de los valores del factor pendiente en la zona de estudio

Pendientes			
Factor pendiente	Clasificación	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
0	Planicie	0.084	1.11
1	Pendiente muy baja	0.166	2.19
2	Pendiente baja	0.279	3.67
3	Pendiente moderada	0.771	10.16
4	Pendiente fuerte	5.102	67.25
5	Pendiente muy fuerte	1.185	15.62

Fuente: Elaboración propia

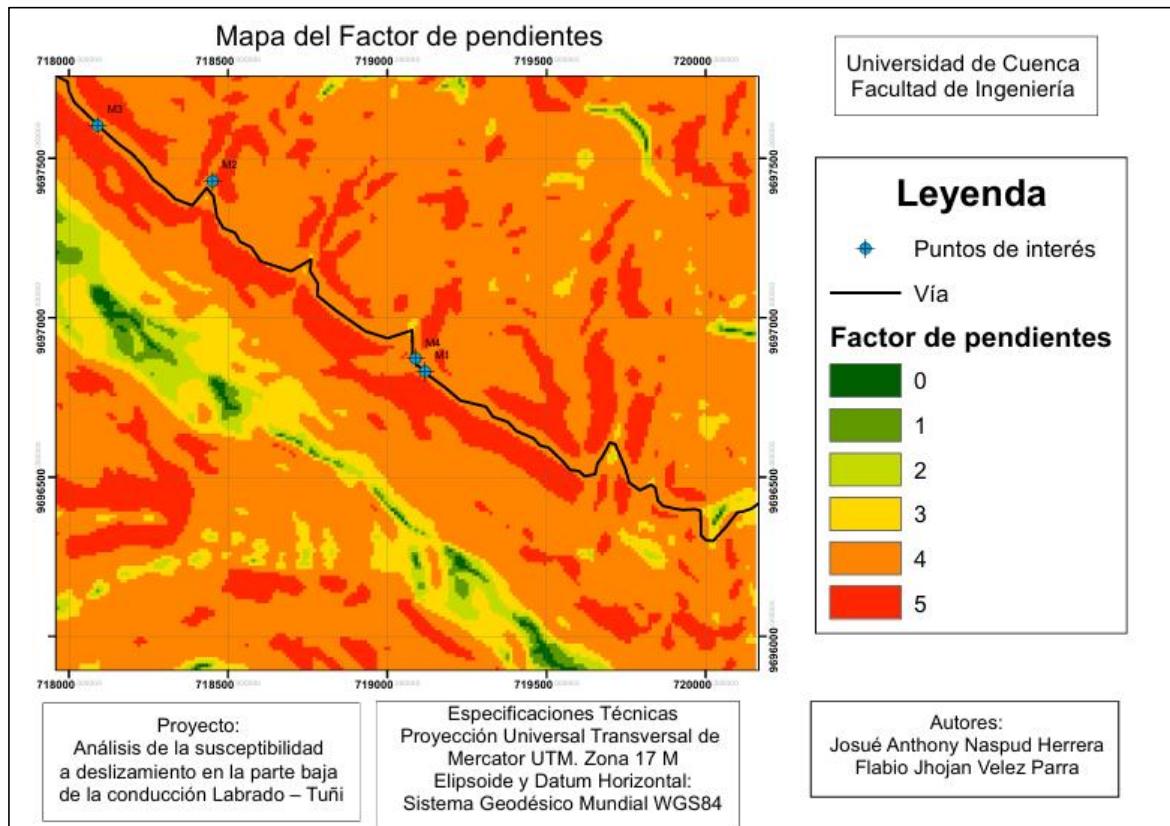


Figura 41. Mapa del factor de pendientes. Fuente: Elaboración propia a partir de la información topográfica de Elecausto

5.7.2. Mapa del factor litológico

Las ponderaciones para la obtención del factor litológico se realizaron con la información de la carta geológica de Cuenca a través de (Instituto geográfico militar del Ecuador, 2009) y por medio de las visitas de campo, al observar el grado de alteración de las rocas. En este mapa geológico, se identificó que la zona de la parte baja de la conducción Labrado - Tuñi

se encuentra formada en su mayoría por material volcánico, por depósitos coluviales y depósitos aluviales. La formación geológica que más predomina en la zona de estudio es la Formación Célica (Kc) con un 64.76% esta formación se caracteriza por la presencia de tobas y andesitas; de acuerdo a las visitas de campo se logró identificar, la alteración de estos materiales, en diferentes medidas por lo que se decidió colocar una valoración de 2, de acuerdo al grado de alteración que se observó como cambios en la coloración de las rocas, fracturas y desprendimiento del material rocoso. Para la Formación Targui (PT) que se conforma por materiales de origen volcánico, se encontraron indicios de alteración en las rocas como decoloración de la superficie y fracturas en las rocas, por lo tanto, se decidió otorgar una valoración de 1. Para los depósitos aluviales (Qa), que se vieron en la hoja geológica de Cuenca, se otorgó una valoración de 1, porque se pudo observar alteración en la coloración del material; estas valoraciones se muestran en la Tabla 30.

A los movimientos de masas se les otorga una valoración diferente en función del área de deslizamiento y del área de la unidad geológica como se muestra en la Tabla 31, donde se puede observar el valor asignado según las consideraciones anteriores. El mapa del factor litológico generado a través de la información geológica de Cuenca se muestra en la Figura 42.

Tabla 30. Distribución del factor litológico de acuerdo a la geología de la zona

Litología					
Código	Tipo de material	Factor litológico	Clasificación	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
Kc	Andesita y Toba	2	Media	9.28	64.55
Qa	Depósitos Aluvial	1	Moderado	1.68	11.66
PT	Toba, Riolitas y Andesita	1	Moderado	3.37	23.45

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31 Valores de S_L obtenidos para los movimientos de masa

Micro cuencas	Área microcuenca (Km ²)	Unidad Geológica	Área de la formación (Km ²)	Área de movimientos de masa (Km ²)	Densidad de movimientos de masa (D1)	D2	Valor SL
1	0.21	Kc	0.18	0.026	0.144	0.124	1.161
		gt	0.03	0	0		0
2	0.73	Kc	0.70	0.022	0.031	0.03	1.033
		gt	0.03	0	0		0

Fuente: Elaboración propia

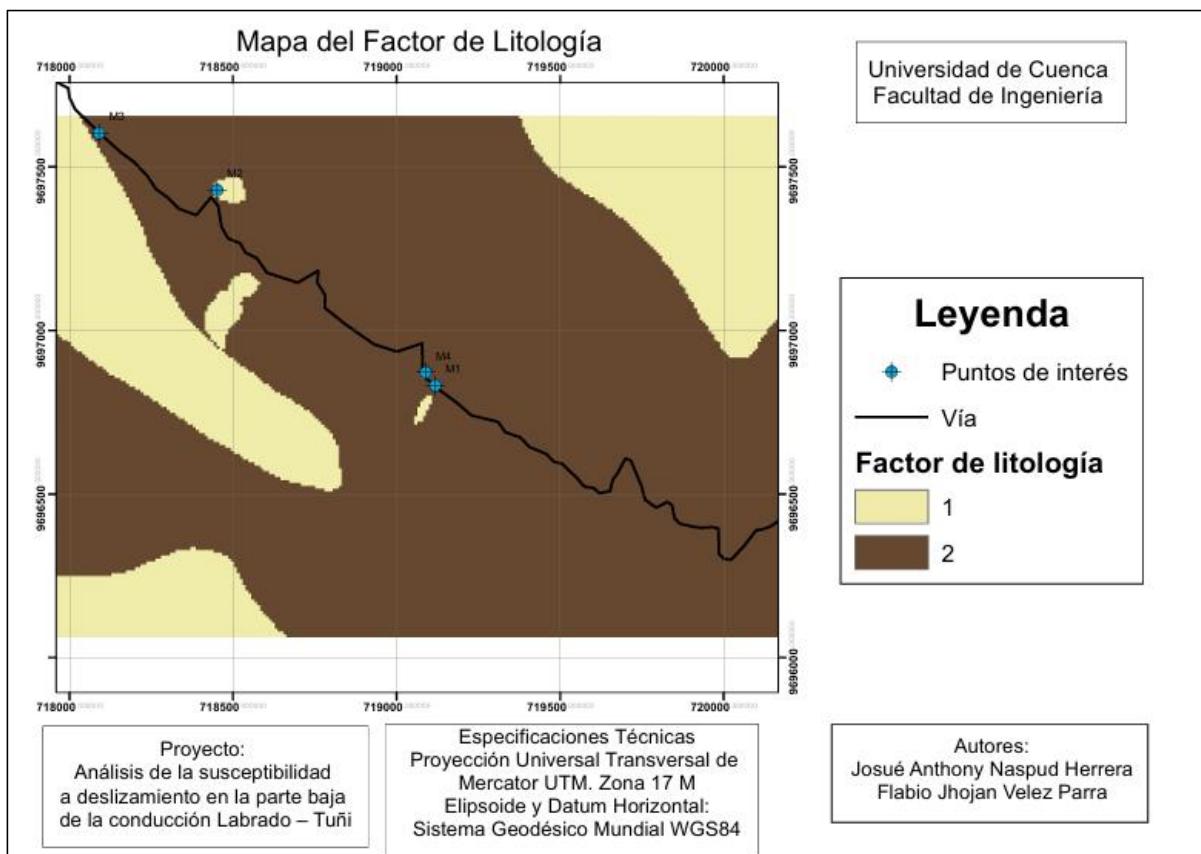


Figura 42 Mapa del factor litológico en el software ArcGIS. Fuente: Elaboración propia a partir de la información geológica de Cuenca

5.7.3. Mapa del factor de humedad

La evapotranspiración potencial mensual del sector de Labrado, del estudio realizado por Carchi, (2015), oscila entre valores de 40 mm/mes y 50 mm/mes como se muestra en la Tabla 19. Al restar las precipitaciones promedio mensuales de la estación EL Labrado de los años 1985 al año 2015, que se pueden observar en la Tabla 20 y la Tabla 21, con los valores de evapotranspiración potencial, se obtiene de manera indirecta la humedad de la zona, como se observa en la Tabla 32.

Tabla 32 Valores de humedad obtenidos de manera indirecta de la zona de estudio

Mes	Humedad del suelo (mm/mes)											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Valor	60.27	71.10	93.17	108.57	84.39	60.11	55.66	25.71	26.12	57.27	57.43	50.44

Fuente: Elaboración propia a partir de la información de INAMHI y Carchi (2015)

Para el cálculo de la humedad con los datos proporcionados por Etapa; se calculó la lámina de agua a partir de los datos volumétricos de agua en el suelo según la estación El Labrado del año 2015, considerando una profundidad del suelo de 50 cm; según el mapa edafológico de Ecuador, toda la zona de estudio está cubierta por Andisoles, y esta profundidad se considera promedio para este tipo de estratos. Con esto se obtuvo un promedio mensual de los valores de humedad de agua en el suelo como se observa en la Tabla 33.

Tabla 33 Valores de humedad obtenidos con información de la estación de El Labrado

Humedad del suelo (mm/mes)												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Valor	102.56	135.26	148.56	141.66	134.58	156.28	118.16	111.68	118.52	114.65	90.88	120.07

Fuente: Elaboración propia a través de información proporcionada por ETAPA.

Al comparar los valores de humedad de la Tabla 32 y la Tabla 33, se observa que los valores obtenidos por el método indirecto son notablemente menores que los valores calculados utilizando los datos de la estación El Labrado. Esto sugiere que los valores obtenidos de manera indirecta podrían no representar completamente las condiciones reales de humedad del suelo. Por lo que, para este estudio, se usaron los valores de la Tabla 33.

En la Tabla 33, se observa que, durante los meses de febrero, marzo, abril, mayo y junio, la humedad del suelo supera los 125 mm/mes, lo que se traduce en una asignación de peso de 1 según la Tabla 9. Esta tabla clasifica la humedad mensual del suelo con valores de 0 a 2. En los demás meses, la humedad es inferior a 125 mm/mes, lo que según la Tabla 9 se traduce en una asignación de valor de 0. La suma de todas las valoraciones mensuales resulta en un valor constante de 2 para el factor de humedad en el mapa, según la Tabla 10, lo cual indica una ausencia de zonas diferenciadas de humedad, por lo tanto, el mapa del factor de humedad es constante.

5.7.4. Mapa del factor de cobertura vegetal

El mapa de cobertura vegetal, basado en la información proporcionada por el Ministerio de Agricultura y Ganadería, refleja en gran medida lo observado en la zona de estudio durante las visitas de campo. Sin embargo, no incluye los movimientos de masas presentes en la zona. Por lo tanto, se decidió agregar esta información al mapa para tener una representación más aproximada de la realidad.

En la zona de estudio se identificaron 3 movimientos de masas, las zonas de estos movimientos se catalogaron para la generación del mapa del factor de cobertura vegetal como deslizamientos y, se otorgó a estas zonas una valoración de 4 por ser zonas alteradas sin cobertura vegetal. En la Tabla 34 se muestra el porcentaje de área de cada tipo de cobertura, en relación al área total del estudio, en la Figura 43 se observa el mapa del factor de cobertura vegetal, con los movimientos de masa que se identificaron.

Tabla 34 Distribución y densidad de la cobertura y uso del suelo que se encuentra dentro de la zona de estudio

Cobertura y uso del suelo			
Tipo de cobertura	Área (Km ²)	Porcentaje (%)	Factor SC
Deslizamiento	0.038	0.641	4
Páramo arbustivo muy alterado	0.006	0.094	3
Páramo arbustivo poco alterado	1.593	26.912	1
Páramo herbáceo poco alterado	3.058	51.667	1
Pasto cultivado	1.135	19.177	2
Pino	0.047	0.789	1
Vegetación herbácea húmeda poco alterada	0.043	0.721	1

Fuente: Elaboración propia modificado de (Cabrera, 2021)

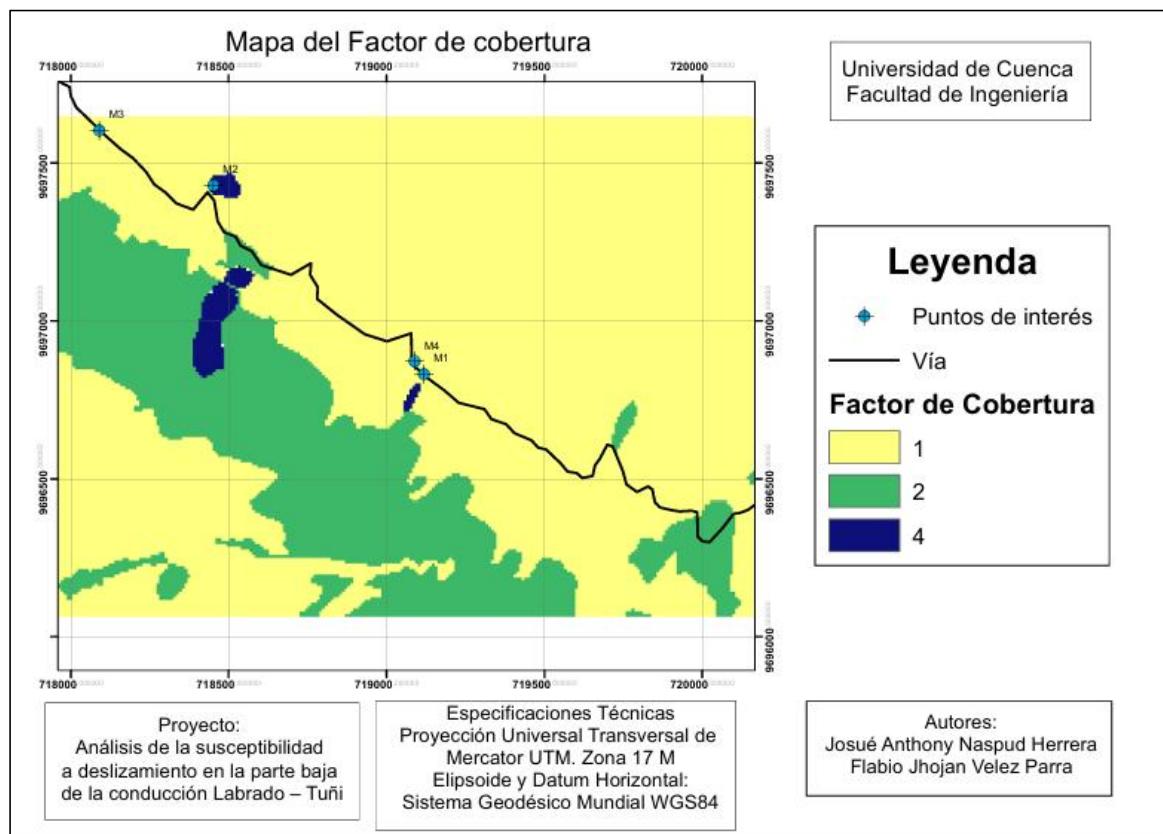


Figura 43 Mapa del factor de cobertura vegetal generado en el software ArcGIS. Fuente: Elaboración propia con información del Ministerio de Agricultura y Ganadería.

5.7.5. Mapa del factor de precipitación

En la estación El Labrado, se cuenta con un registro de precipitaciones diarias menor a los 10 años, por lo que se realizó un promedio aritmético para determinar la máxima precipitación ocurrida durante el registro de datos. De acuerdo a esta información la precipitación máxima en la estación de El Labrado es de 30.2 mm/día y de la estación de Chanlud es de 44.3 mm/día. Para estimar el dato de precipitación máxima en la zona de estudio se realizó una ponderación de las precipitaciones máximas de las estaciones de El Labrado y Chanlud de acuerdo con la distancia a la que se encuentran a la zona de estudio, para la cual se estimó que la precipitación máxima que ocurrió en la zona de estudio es de 35.17 mm/día. Esta precipitación se clasificó de acuerdo a la Tabla 12 del método de Mora & Varhson, conforme a esta clasificación se tiene que el factor de disparo por precipitación para toda la zona de estudio es de 1.

5.7.6. Mapa del factor de sismicidad

Sabiendo que la zona de estudio se encuentra en el austro del Ecuador y de acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción en esta zona se emplea un valor de 0.25 del PGA, lo que coloca a toda la zona en una categoría del factor de disparo de sismicidad igual a 3 según la Tabla 13, en esta tabla se asigna una valoración en el rango de 0 a 10, considerando el valor de PGA. Dado que este valor del PGA se utiliza en la mayor parte del austro ecuatoriano, el mapa del factor de sismicidad se mantiene constante.

5.8. Mapa de susceptibilidad

Los rangos en el mapa de susceptibilidad elaborado por medio del software ArcGIS, son diferentes a los rangos propuestos en el método de Mora & Varhson; esto se debe a que los factores condicionantes y detonantes que se identificaron en la zona de estudio por medio de los mapas elaborados son menores a los valores de los rangos de susceptibilidad, en el estudio para la generación de la metodología de Mora & Varhson en Costa Rica. Para representar de manera más precisa la susceptibilidad de la zona de estudio, se elaboró una nueva clasificación que se ajusta mejor a la realidad observada. Esta nueva clasificación se realizó mediante un histograma que se puede observar en la Figura 44, basado en los datos generados a partir de la combinación de los factores condicionantes y detonantes. En esta clasificación se establecieron cinco rangos de valores para la susceptibilidad, los cuales pueden clasificarse dentro de las categorías propuestas en la metodología de Mora & Varhson, como se observa en la Tabla 35.

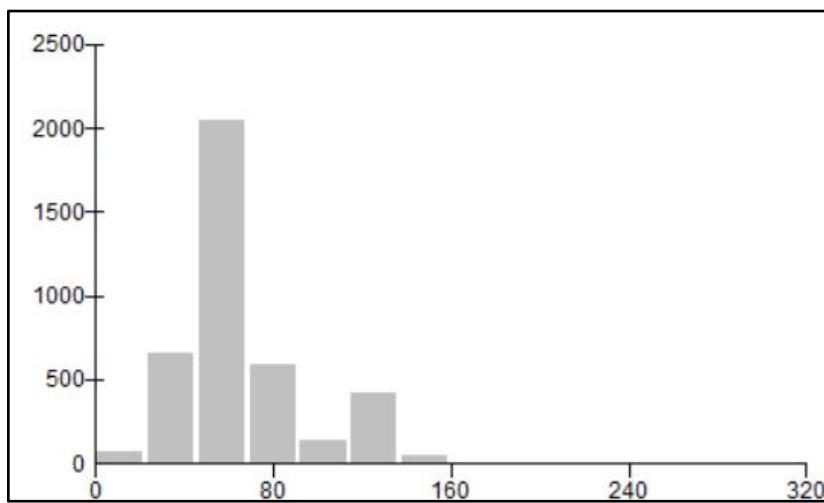


Figura 44 Histograma del índice de susceptibilidad de la zona estudiada: Fuente: Elaboración propia

Tabla 35 Nueva valoración de la clasificación de la susceptibilidad

Índice de susceptibilidad	Clasificación	Potencial de deslizamiento	Color asignado
0 - 40	I	Muy bajo	Verde oscuro
40 - 64	II	Bajo	Verde claro
64 - 96	III	Moderado	Amarillo
96 - 159	IV	Mediano	Naranja
159 - 320	V	Alto	Rojo

Fuente: Modificado (Mora & Varhson, Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination, 1994)

Según el resultado del mapa de susceptibilidad mostrado en la Figura 45, se observa que la susceptibilidad muy baja cubre aproximadamente el 18.261% del área total de estudio. El rango de susceptibilidad baja es el más extenso, abarcando un 52.397% del área, mientras que el grado de susceptibilidad moderada se localiza principalmente a ambos lados de la vía, en estos rangos, mayormente se encuentran pendientes bajas y poca alteración en la cobertura vegetal. El rango de susceptibilidad mediana se encuentra mayormente en las áreas de pasto cultivado, por lo que el factor que más afecta la susceptibilidad en estas zonas es la cobertura vegetal, además de tener pendientes fuertes. Por otro lado, el rango de susceptibilidad moderada se localiza principalmente en áreas de pasto cultivado, donde

la cobertura vegetal y pendientes fuertes son factores determinantes. Las zonas con alta susceptibilidad se identifican en áreas donde han ocurrido previamente movimientos de masa y se observa una falta de cobertura vegetal. Considerando estos resultados se podría decir que el rango de susceptibilidad en la zona de estudio se ve altamente influenciado por la cobertura vegetal. El porcentaje de área que ocupa cada rango de susceptibilidad se observa en la Tabla 36.

Tabla 36 Distribución y densidad de los rangos de susceptibilidad en la zona de estudio

Susceptibilidad		
Rango de susceptibilidad	Área (Km ²)	Porcentaje (%)
Muy bajo	0.651	18.261
Bajo	1.867	52.397
Moderado	0.627	17.603
Mediano	0.412	11.572
Alto	0.006	0.168

Fuente: Elaboración propia.

Resumiendo, la Figura 45 donde se ve el mapa de susceptibilidad de la zona de estudio, las áreas con baja susceptibilidad ocupan la mayor parte del estudio, seguidas por las de susceptibilidad moderada y mediana. Por el contrario, las áreas con alta susceptibilidad son las menos extensas.

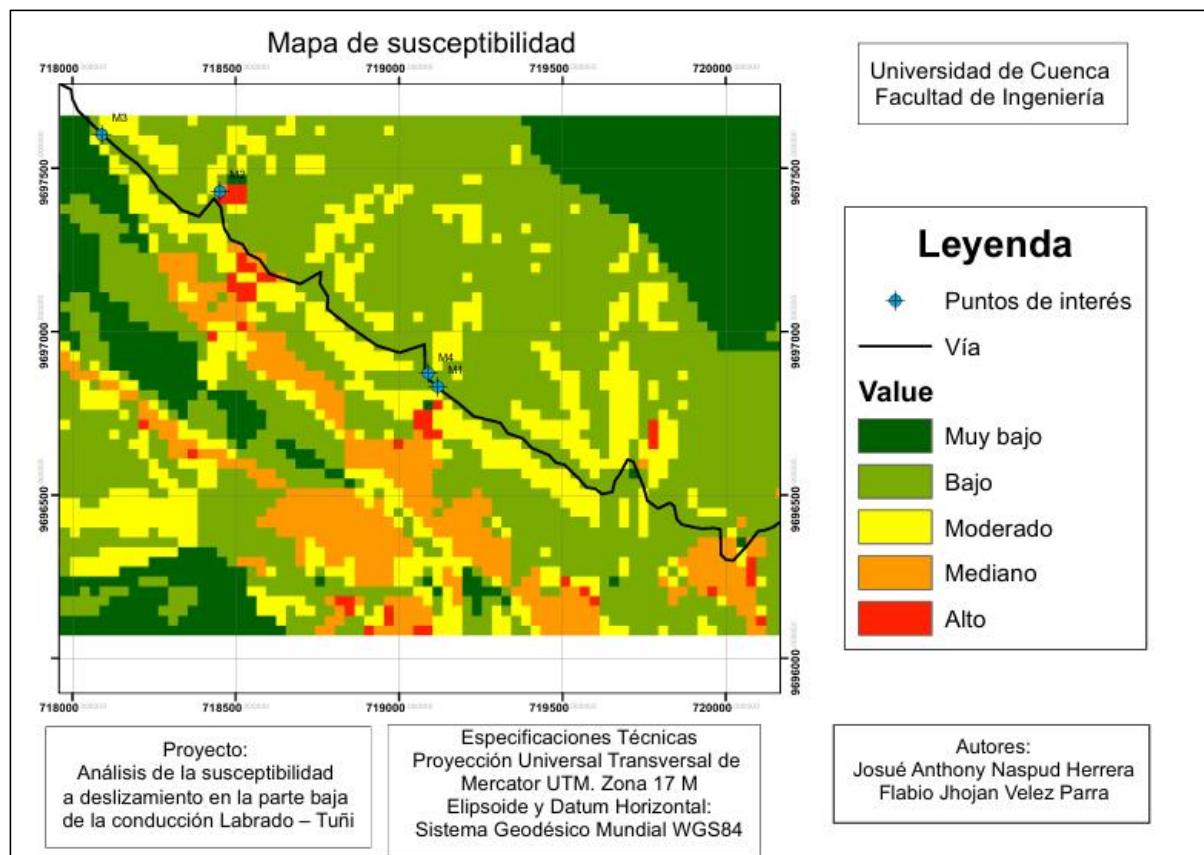


Figura 45 Mapa de susceptibilidad por el método Mora & Varhson de la zona de estudio. Fuente: Elaboración propia.

5.9. Propuestas de mitigación y prevención

Los movimientos de masa 2 y 3 que se encuentran en la parte inferior del canal, son causados por taponamientos que se dieron en el canal de conducción debido a movimientos de masa en la parte superior. Por lo tanto, los trabajos de mitigación podrían concentrarse en la zona superior del canal de conducción. Aunque estos movimientos de masa sean menores que los de la parte inferior, provocan el taponamiento del canal, lo que redirige el agua hacia las partes inferiores del canal de conducción, causando inundaciones, y posteriormente complicaciones relacionadas con los movimientos de masa en la parte inferior del canal.

De acuerdo con los resultados de granulometría, resistividad y comparándolos con el mapa de susceptibilidad, las obras de mitigación podrían enfocarse en los movimientos de masa en zona de la quebrada Q1 y los posibles movimientos de masa en la zona de la quebrada Q2.

5.9.1. Propuestas para los movimientos de masa en la zona de la quebrada Q1:

Los movimientos de masa en esta zona son: el movimiento de masa 1 y el movimiento de masa 2. Entre las alternativas de mitigación para estas zonas, se pueden sugerir varias opciones que ayuden a la estabilidad de los taludes, tales como: muros de contención, escalonado del terreno y revestimientos.

Se puede decir que el movimiento de masa 1 parece estable y no presenta deslizamientos activos. Sin embargo, el riesgo aumenta con precipitaciones intensas, según los resultados de este estudio. Esta misma interpretación se aplica al movimiento de masa 2. Estos movimientos de masa al no tener un empuje activo, o actividad reciente de movimientos de masas, se podrían considerar alternativas que mejoren la escorrentía superficial y eviten infiltraciones en los estratos inferiores de ambos taludes; que es uno de los problemas que podrían complicar la estabilidad de los taludes como se observó en los resultados de las tomografías eléctricas, adicionalmente se podrían considerar estrategias de contención superficial del talud.

Entre las posibles metodologías de mitigación aplicables para los problemas presentados en la zona de la quebrada Q1 están:

- La hidrosiembra con vegetación de la zona.

Se propone esta probable solución, la cual se seleccionó debido a la pérdida significativa de vegetación nativa en estas zonas de movimientos de masa, como se puede observar en los resultados del análisis de movimientos de masa cercanos a la quebrada Q1. Esta propuesta no alteraría la cobertura vegetal de la zona.

- Plantación vegetal en barrera.

Este procedimiento podría ser implementado en la zona, aunque se requiere un análisis para determinar si la vegetación de la zona cumple con los requisitos de perennidad. Introducir especies nuevas podría alterar la cobertura vegetal e incrementar la complejidad de los movimientos de masa.

- Geoceldas

Las geoceldas serían una opción adecuada para estabilizar estos taludes con movimientos de masa inactivos, pero sin cobertura vegetal debido a su capacidad para proporcionar estabilidad estructural a largo plazo. Además de prevenir la reactivación de movimientos de masa, se podría controlar la erosión del suelo y facilitar la revegetación al ofrecer un soporte estable para el crecimiento de plantas. Esto no solo promueve la recuperación ambiental del área, sino que también reduce la necesidad de mantenimiento continuo del talud.

5.9.2. Propuestas para la zona de la quebrada Q2

Aunque en esta zona no se han presentado movimientos de masa, el mapa de susceptibilidad indica una vulnerabilidad entre moderada y alta a movimientos de masa en el talud analizado para los ensayos de resistividad eléctrica, paralelo a la quebrada Q2. Por ello, se podrían implementar medidas preventivas.

Los resultados de resistividad eléctrica muestran que el talud está compuesto mayoritariamente por suelos finos y, en caso de que se diera una infiltración significativa de agua lluvia desde la superficie hacia estos estratos, se podrían tener complicaciones con la estabilidad de este talud. Para mitigar este riesgo, se podría proponer un método que permita una adecuada escorrentía.

Por lo tanto, la revegetación con plantas nativas de la zona es una buena opción, ya que disminuiría la infiltración hacia los estratos inferiores, mejorando la cohesión del suelo y reduciendo la posibilidad de movimientos de masa.

6. Conclusiones

- Los parámetros granulométricos y de plasticidad de las muestras superficiales indican que los suelos en los puntos analizados presentan una buena estabilidad y no muestran una mayor probabilidad de movimientos de masa bajo condiciones normales. Sin embargo, la mala graduación observada en las muestras M1 Y M3, puede reducir la cohesión interna y, junto con la saturación de agua, incrementar la susceptibilidad a movimientos de masa. Estos resultados sugieren que los suelos superficiales analizados no tienen un riesgo significativo de movimientos de masa, indicando que los problemas de estabilidad pueden ser causados por materiales que se encuentran en estratos inferiores.
- Con respecto a los ensayos de resistividad eléctrica: La estratigrafía del talud de la zona de la quebrada Q1 revela una concentración de materiales finos en los estratos inferiores, lo cual sugiere una mayor susceptibilidad a movimientos de masa en esta área. La presencia de arcillas y limos en estos estratos podría indicar baja resistencia al corte, que podría debilitarse aún más con la saturación. Esto puede ocurrir si los materiales más rígidos (gravas y arenas) de los estratos superiores, permiten una significativa infiltración de agua hacia las zonas más profundas. Adicionalmente, la ausencia de una capa de cobertura vegetal en este talud podría complicar este problema, ya que se podría dar que la mayor parte del agua de lluvia drenaría a través de las capas superiores. En contraste, los resultados del talud de la zona de la quebrada Q2, que cuenta con una cobertura vegetal, sugiere que la infiltración de agua es menos probable. No obstante, podrían surgir complicaciones relacionadas con movimientos de masa si se presenta una saturación significativa de los materiales blandos ubicados en la parte media del talud. Es importante destacar

que estas observaciones son interpretaciones preliminares y que sería necesario complementar los estudios de resistividad con ensayos adicionales para una clasificación más precisa de la estratigrafía en esta zona.

- Con los resultados del análisis del talud de la zona de la quebrada Q1, se puede inferir que los movimientos de masa y el acarreo de material en este talud, probablemente se originaron entre los años 2015 y 2017 debido a eventos de una lluvia intensa. Estos eventos pudieron haber causado un aumento significativo del caudal en la quebrada, facilitando el acarreo de material desde las partes superiores. Por otro lado, la saturación del suelo por el exceso de agua podría haber contribuido a los movimientos de masa observados. Adicionalmente, el sismo de 2016 en Manabí, Ecuador, podría haber influido en los movimientos de masa observados en este talud. La energía liberada durante el sismo podría haber desestabilizado las pendientes, facilitando el movimiento de masa.
- Al analizar todos los parámetros de Mora & Varhson, se elaboró una correlación entre los factores intrínsecos (pendientes, litología, humedad y cobertura vegetal) y los factores externos (precipitación y sismicidad) en la zona de estudio. Para el área de estudio se pudo observar que los parámetros de litología, pendientes, y cobertura vegetal, son los parámetros que más influyen en la zona de estudio para la susceptibilidad a movimientos de masas.

Es importante mencionar que los parámetros de precipitación, humedad y sismicidad pueden mantenerse constantes y no afectar directamente la susceptibilidad a movimientos de masa en la zona de estudio. Sin embargo, no se debe descartar la posibilidad de que un evento extremo aislado ocurra y altere estos parámetros. Esto podría provocar que zonas con baja o moderada susceptibilidad aumenten su nivel de riesgo de manera significativa en un corto periodo de tiempo, generando movimientos de masa.

- Según los resultados del mapa de susceptibilidad, se observa que los rangos de baja y moderada susceptibilidad se distribuyen a lo largo del canal, con características similares tanto en la parte inferior como en la superior. La principal diferencia entre estos dos rangos radica en la pendiente del terreno. Por otro lado, la susceptibilidad mediana se concentra principalmente en la parte inferior del canal, donde se encuentran pastos cultivados y pendientes pronunciadas que alteran la cobertura vegetal. Las áreas de alta susceptibilidad se localizan donde han ocurrido movimientos de masa y en el talud de la quebrada Q2, destacando la ausencia de cobertura vegetal como factor crucial, especialmente en las zonas afectadas por movimientos pasados y en el talud donde también hay presencia de pasto cultivado, afectando la cobertura vegetal existente.
- Con base en los resultados obtenidos se pudieron plantear y proponer algunas técnicas de mitigación. Entre estas, la hidrosiembra con vegetación nativa local, plantación vegetal en barrera y geoceldas. Se podría decir que, en comparación con la hidrosiembra y la plantación vegetal en barrera, las geoceldas ofrecen una solución posiblemente más duradera para estabilizar los movimientos de masa cercanos a la quebrada Q1. Mientras que la hidrosiembra y la plantación vegetal en barrera se enfocan en mejorar la cobertura vegetal para controlar la erosión superficial y mejorar la estabilidad inmediata, las geoceldas proporcionan estabilidad estructural a largo plazo mediante un soporte físico que también facilita la

revegetación. Además, las geoceldas podrían reducir la necesidad de mantenimiento continuo del talud en comparación con las alternativas basadas en vegetación, que pueden requerir cuidados regulares y replantaciones. Sin embargo, es crucial evaluar la implementación de geoceldas para minimizar cualquier impacto potencial en el entorno natural y la dinámica hidrológica local.

Referencias

- Angelone, S., Garibay, T., & Marina, C. (2006). *Permeabilidad de suelos*. Rosario.
- ASTM INTERNATIONAL D 422-63. (2002). *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*.
- ASTM INTERNATIONAL D2216-10. (1988). *Métodos de prueba estándar para determinar en laboratorio el contenido de agua (humedad) del suelo y roca por masa*.
- ASTM INTERNATIONAL D2487-11. (2011). *Práctica Estándar para la Clasificación de Suelos para Propósitos de Ingeniería (Sistema de Clasificación Unificada de Suelos)*.
- Baldock. (1982). *Geología del Ecuador*. Quito: Ministerio de Recurso Naturales y Energéticos.
- Barrantes, G. (2015). Lecciones aprendidas en gestión del riesgo de deslizamientos: caso zonificación de susceptibilidad por deslizamientos en Cuenca, Ecuador. *I Congreso Internacional Gestión de Riesgos, Ambiente y Energías Alternativas*, (pág. 25). Cuenca.
- Braja, M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*.
- Bravo, J. D. (2000). *Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica (SIG)*. Madrid: CIEMAT.
- Brundle, R., Evans, C., & Wilson, S. (1993). *Encyclopedia of materials characterization*. Manning Publications Co.
- Buzai, G. D. (2013). *Sistemas de información geográfica SIG: teoría y aplicación*. Buenos Aires.
- Caballero Iparraguirre, H. (2018). *Análisis del peligro y vulnerabilidades por movimientos de masa de tierra para mitigar los riesgos en el distrito de Cuenca*. Huancavelica.
- Cabrera, E. M. (2021). *Susceptibilidad a deslizamientos mediante el uso de SIG, a escala 1:10000, del tramo vial comprendido desde: El redondel del barrio el plateado hasta el antiguo peaje del cantón catamyo, provincia de Loja*. Loja: Universidad Nacional de Loja.
- Cañas, J. (2007). Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso . San Salvador.
- Carchi, E. (2015). *Elaboración de un balance hídrico de la cuenca del río Machángara*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Centro Universitario de Mérida. (2020). *Tomografía eléctrica fundamentos y aplicaciones*. Mérida.
- Chaberri Molina, I. F. (2016). *Zonificación de la susceptibilidad a deslizamiento, por medio de la metodología Mora - Vahrson, en la microcuenca del río Macho, San José*,

Costa Rica. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica Escuela de Ingeniería Forestal.

Coduto, D. P. (1999). *Geotechnical Engineering Principles and Practices*. New Jersey: ALAN APT.

Das, B., & Khaled, S. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica: principios y aplicaciones*. Pearson Educación.

Díaz, E. (2010). *Implementación del código Zondres2D para la modelación directa e inversa de datos de tomografía de resistividad eléctrica 2D*.

Díaz, F. (2004). *Estudio comparativo de metodologías de zonificación de amenaza por movimientos de masas aplicado al sector rural de Villaviciencio*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Escobar, D., Gonzalo, & Escobar, P. (2016). *GEOMECÁNICA*. Manizales.

FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma.

Flores Ramirez, E. (2024). *Correlación entre la resistividad eléctrica y las propiedades geotécnicas del suelo*. Cuenca.

Gerscovich, D. M. (2012). *Estabilidad de taludes*. Sao Paulo: Lemoine Editores.

INAMHI. (2015). *Determinación de ecuaciones para el cálculo de intensidades máximas de precipitación*. Quito.

INEN. (1982). *NTE INEN 0691: Mecánica de suelos. Determinación del límite líquido método de Casa Grande*.

INEN. (1982). *NTE INEN 0692: Mecánica de suelos. Determinación del límite plástico*.

Instituto de Investigación Geológico y Energético del Ecuador. (12 de abril de 2024). *Mapas Temáticos 1:100000*. Obtenido de <https://www.geoenergia.gob.ec/mapas-tematicos-1-100-000/>

Instituto Geográfico Militar. (1973). *Hoja Geológica Gualturo escala 1:100000*. Dirección general de Geología y Minas.

Instituto geográfico militar del Ecuador. (2009). *Hoja Geológica Cuenca Escala 1:100000*. Ministerio de Minas y Petróleos.

ISRM. (1981). *Suggested method for determination of the Shear Strength of Rock*.

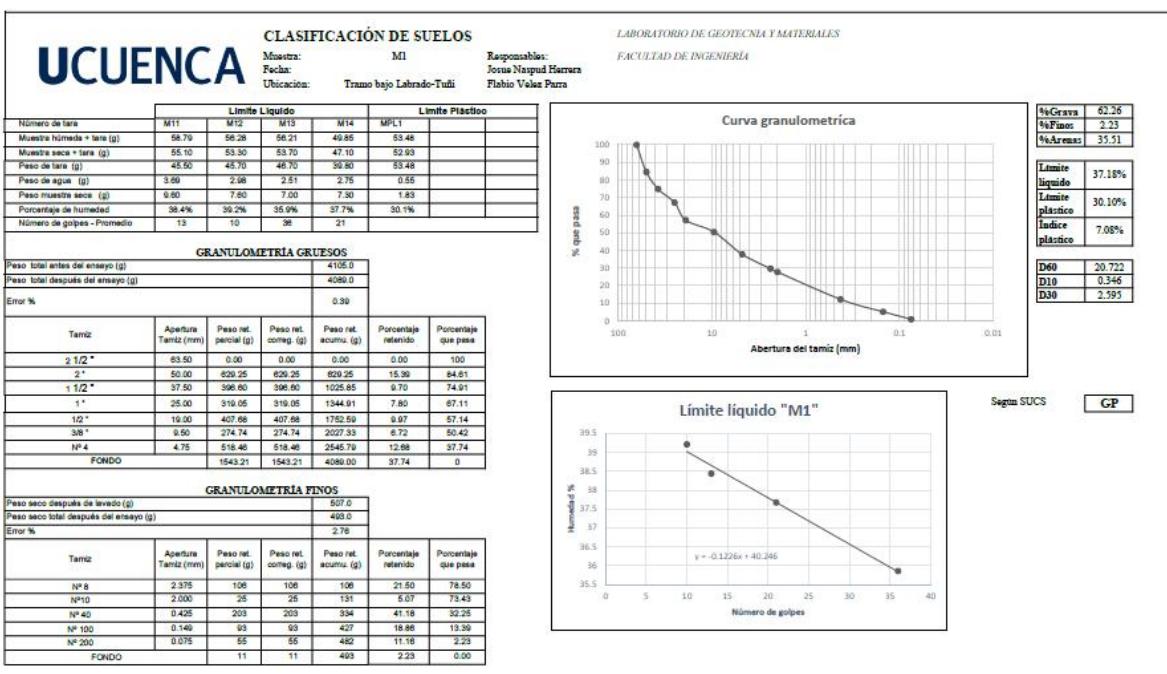
Jefferson, J., & Joao, P. (2016). *Aplicación del método Mora Vahrson para la clasificación de la susceptibilidad a los deslizamientos de la vía Macas - Riobamba en la parroquia ZUÑAC*. Macas: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Julca , C., Linares , R., & Quinteros , E. (2021). *Estabilización de los taludes de la Costa Verde empleando el método de la hidrosiembra en el tramo entre la calle Colón y la Bajada Malecón Balta del distrito de Miraflores*. Lima.

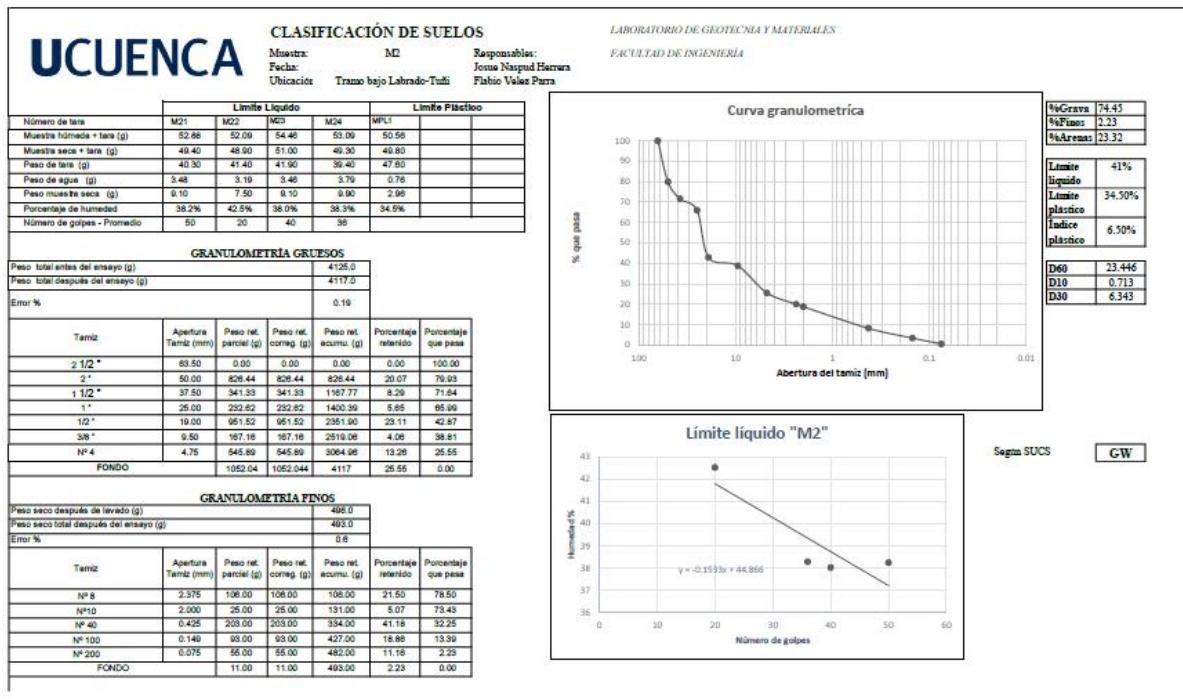
- Knödel, K., Krummel, H., & Lange, G. (2005). *Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten*. Berlín: Springer.
- Lozano, A. (2009). *MARTILLO SCHMIDT (ESCLERÓMETRO)*.
- Milsom, J. (2023). *Field Geophysics*. California: WILEY.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (2008). *Mapa de órdenes de suelos del Ecuador*.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería. (20 de Junio de 2024). *Datos abiertos*. Obtenido de <https://datosabiertos.gob.ec/dataset/mapa-de-cobertura-y-uso-de-la-tierra-y-sistemas-productivos-agropecuarios/resource/98557be5-8fef-4342-b6e8-6c566343da3d>
- Monteros Sarsosa, I. (2012). *Estudio para la estabilización del talud del Km 13 al 15 de la Carretera “Calderón – Guayllabamba”*. Quito.
- Mora, S., & Varhson, W. (1992). *Mapa de Amenaza de Deslizamientos, Valle Central, Costa Rica*. Costa Rica: CEPREDENAR.
- Mora, S., & Varhson, W. (1994). Macrozonation Methodology for Landslide Hazard Determination. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 49 - 58.
- NEC-SE-DS. (2015). *Peligro sísmico diseño sismo resistente*.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2013). *Curvas IDF para las regiones Metropolitana, Maule y Biobío. Intensidades desde 15 minutos a 24 horas*.
- Organization of American States. (1973). *Clasificación taxonómica de los suelos identificados*.
- Ovalle, C., Rodríguez, F., Osman, A., Espinoza, S., & Pozo, A. d. (2020). *Cubiertas vegetales: una herramienta fundamental para el manejo sustentable del suelo en huertos frutales, viñedos y hortalizas*. Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Pantigozo Huamani, E. (2021). *Aplicación de tierra reforzada para el diseño de estructuras de contención de los taludes en la zona de Jahuay-Chincha*. Ica.
- Patiño, S. (2019). *Identificación de áreas susceptibles a amenazas y riesgos naturales provocadas por deslizamiento de tierras mediante el uso de SIG en el cantón Mira*. Ibarra.
- Patzelt, A., Kottmann, A., & Waldhor, M. (2007). *Prospección geoléctrica en la ciudad colonial de Panamá Viejo*. Panamá Viejo: Scholkmann.
- PRECUPA. (1998). *Caracterización geológica de formaciones y unidades geológicas*. Cuenca.

- Ríos, D., & Villagaray, L. (2021). *Estudio comparativo de estabilidad de taludes entre el sistema de drenaje por perforación con anclajes y el sistema de gaviones con banquetas en la Carretera Central, Cerro Pucruchacra, San Mateo*. Lima.
- Rosa Ruiz, H. T. (2008). *Manual de procedimientos de delimitación y codificación de unidades hidrográficas*. UICN SUR.
- Sánchez Reynoso, A. (2011). *Análisis comparativo entre diferentes arreglos de tomografía de resistividad eléctrica 2D*. México, D.F.
- Segura, G., Badilla, E., & Obando, L. (2011). Susceptibilidad al deslizamiento en el corredor Siquirres - Turrialba. *Revista Geológica de América Central*, 101 - 121.
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales. (2004). *Memoria técnica para el mapa de susceptibilidad de deslizamientos de tierra en El Salvador*. San Salvador.
- Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. (2021). *SUBSECRETAÍA DE GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE RIESGOS*. Loja.
- Skempton, A. W. (s.f.). STABILITY OF NATURAL SLOPES AND EMBANKMENT FOUNDATIONS. *Internacional conference on soil mechanics and foundation engineering*, 151 - 155.
- Suarez, J. (2009). *Deslizamientos: Análisis Geotécnico*. Bucaramanga - Colombia.
- Telford, W., Geldart, L., & Sheriff, R. (1990). *Applied geophysics*. New York.
- Universidad de Córdoba. (2014). *Manual de técnicas de estabilización biotécnica en taludes de infraestructuras de obra civil*. Córdoba.
- Universidad del Azuay. (12 de abril de 2024). Obtenido de Información temática digital de la cuenca del río Paute: <https://gis.uazuay.edu.ec/descargas/promsa/paute/home.htm>
- Universidad Nacional de Colombia. (2000). *Las aguas subterráneas de los valles de San Nicolás*. Medellín.

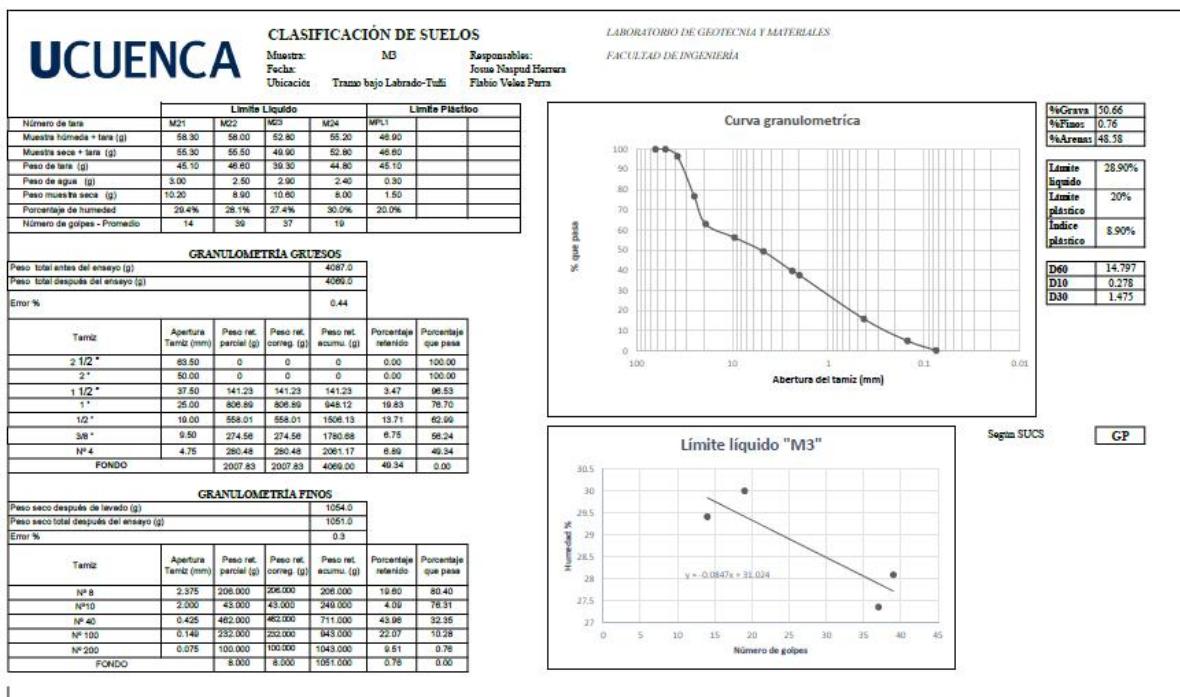
Anexos



Anexo A. Resultados de granulometría y Límites de Atterberg muestra M1. Fuente: Elaboración propia.

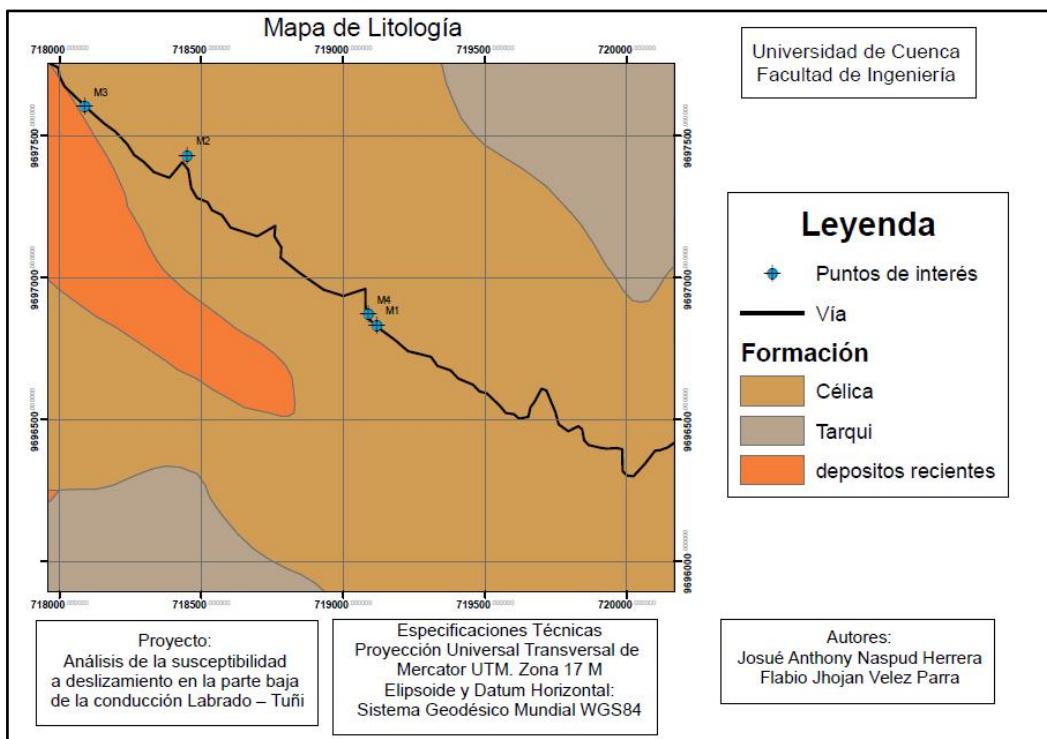


Anexo B. Resultados de granulometría y Límites de Atterberg muestra M2. Fuente: Elaboración propia.

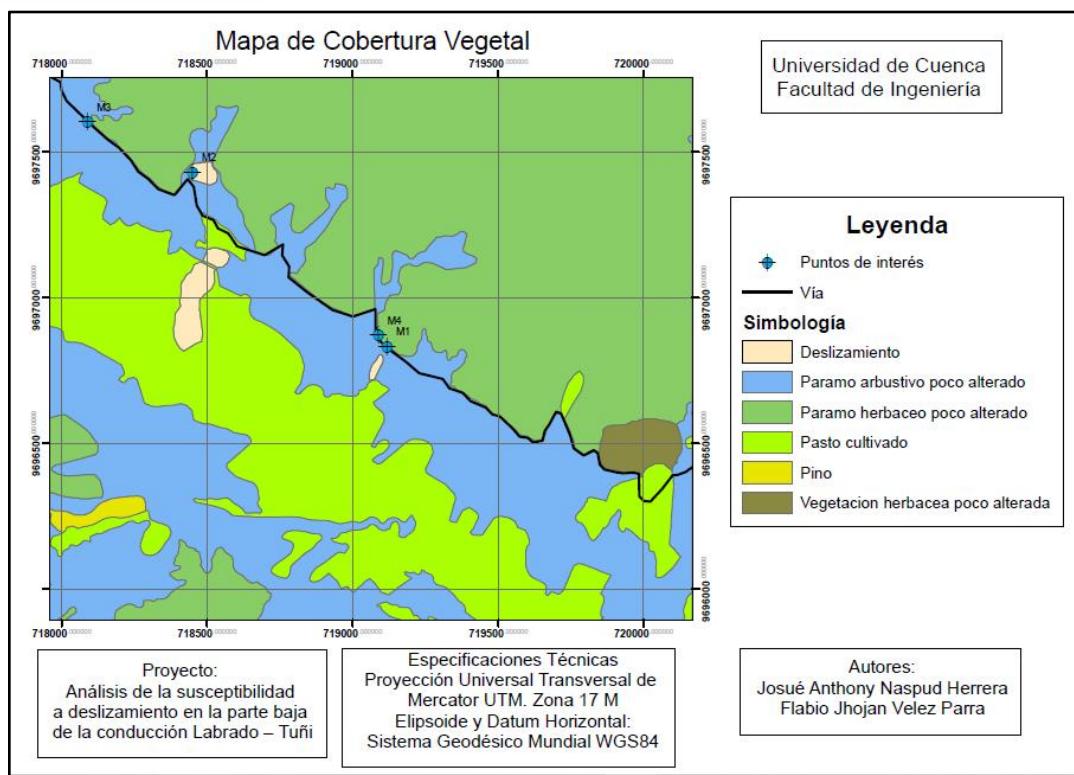




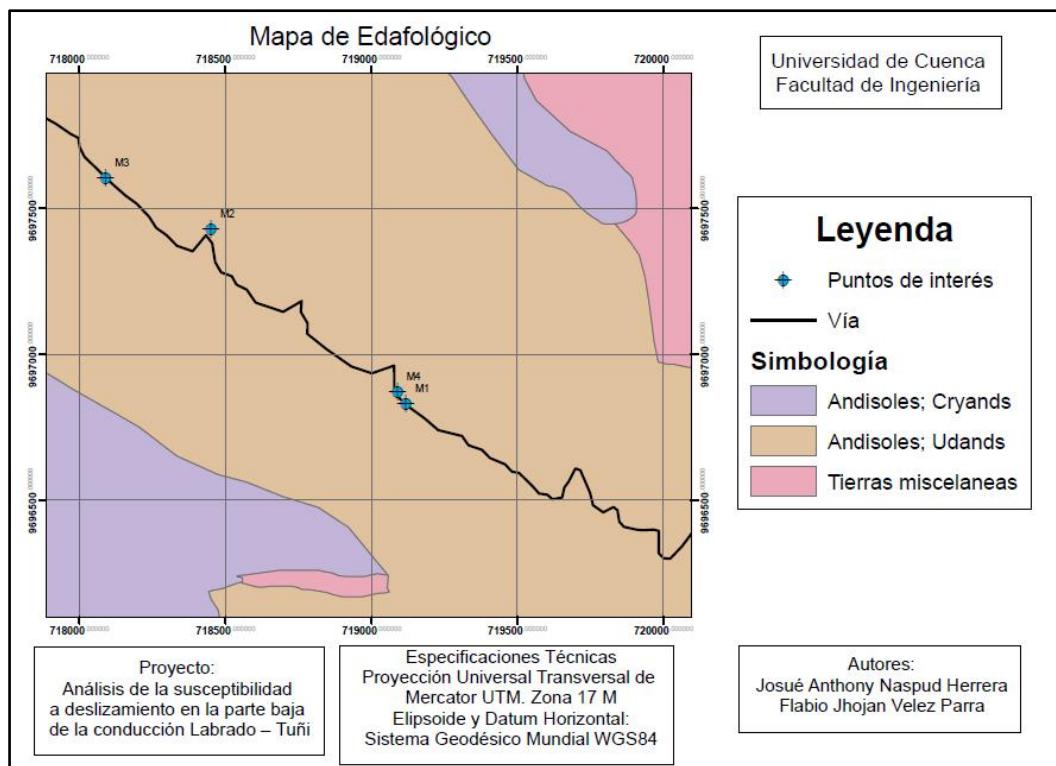
Anexo E. Fotografía de la zona de Labrado - Tuñi, al lado izquierdo de la fotografía se encuentra el canal de conducción de este estudio.



Anexo F. Mapa de Litología de la zona de estudio. Fuente: modificado del mapa geológico de Cuenca.



Anexo G. Mapa de cobertura vegetal de la zona de estudio. Fuente: modificado de mapa de cobertura vegetal del Ministerio de Agricultura y Ganadería



Anexo H. Mapa Edafológico de la zona de estudio. Fuente: modificado del mapa Edafológico del Ecuador del Ministerio de Agricultura y Ganadería