PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE HABITAT INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD

MAESTRÍA DE GEOTECNIA APLICADA



TRABAJO DE TITULACIÓN

Revisión sistemática de Indicadores de Alerta Temprana para la predicción de deslizamientos; Caso De Estudio Vía Barrio Rosas, Cantón Nabón, Provincia Del Azuay.

AUTOR:

Ing. Karen Alexandra Armijos Calle

TUTOR:

MSc. Ing. Mariela Jahaira Macías Párraga

QUITO, AÑO 2026

Dedicatoria

A Dios, por su amor infinito, y a mis padres por ser incondicionales y mi pilar.

Sr. Edgar Ovidio Armijos Jara y la Sra. Narcisa de Jesús Calle Molina

Agradecimientos

A mi directora de Tesis de la maestría, por ayudarme en todo momento, durante el transcurso de esta maestría, y enseñarme que cada día es una nueva oportunidad para empezar de nuevo.

Índice General

RESUMEN 6

ABSTRACT 6

I. INTRODUCCIÓN 7

1.1. Justificación 7

1.2. Planteamiento del Problema 7

1.3. Pregunta del Problema 8

1.4. Objetivos 9

1.4.1. Objetivo General 9

1.4.2. Objetivos Específicos 9

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA 10

2.1. Antecedentes 10

2.2. Marco Teórico y Conceptual 11

2.2.1. Marco Teórico 11

2.2.2. Marco Conceptual 15

Ubicación 25

Mapa de niveles freáticos 26

III. METODOLOGÍA 27

3.1. Tipo de Estudio 28

3.2. Técnicas 29

3.3. Operacionalización de variables 30

3.4. Fases de ejecución 31

IV. RESULTADOS 32

Diagnóstico Geomecánico del Talud y Estabilidad 32

Deslizamiento Rosas (DR) 33

Correlación Geofísica, Piezométrica y Cinemática 36

Matriz de Alerta Temprana (Semáforo Geotécnico) 39

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS 40

5.1. Discusión 40

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 43

6.1. Conclusiones 43

6.2. Recomendaciones 44

VII. BIBLIOGRAFÍA 45

Bibliografía 45

VIII. ANEXOS 49

RESUMEN

La cordillera de los andes en el transcurso de los años enfrenta una problemática severa de vulnerabilidad principalmente en la infraestructura vial ante los continuos movimientos en masa, considerando como punto crítico de estudio, la inestabilidad de sus suelos en el cantón Nabón ubicado en la provincia del Azuay del territorio nacional ecuatoriano. El presente trabajo de titulación, tiene como objetivo principal realizar una revisión sistemática de indicadores de alarma temprana enfocado en la predicción de deslizamientos en un problema constante como lo es: vía en el barrio Rosas del Cantón Nabón. La insuficiencia de los sistemas de alerta tradicionales ha provocado que la inestabilidad del terreno persista desde el macrodeslizamiento ocurrido en 2021. A la fecha, las fallas estructurales y deformaciones continúan activas y visibles. Ante esta realidad, la investigación se apoya en estudios técnicos recientes para analizar alternativas de prevención, con el fin de proponer un sistema de monitoreo optimizado y adaptado a las condiciones reales del sitio.

Palabras Clave: indicadores, monitoreo, deslizamiento, alerta, optimización.

ABSTRACT

Over the years, the Andes mountain range has faced a severe vulnerability problem, primarily affecting its road infrastructure, due to continuous mass movements. A critical point of study is the instability of the soils in the Nabón canton, located in the Azuay province of Ecuador. This thesis aims to conduct a systematic review of early warning indicators focused on predicting gradual changes in a persistent problem: the road in the Rosas neighborhood of the Nabón canton. The inadequacy of traditional warning systems has led to persistent ground instability since the massive landslide of 2021. To date, structural failures and deformations remain active and visible. Given this reality, the research draws on recent technical studies to analyze prevention alternatives, with the goal of proposing an optimized monitoring system adapted to the actual site conditions.

Keywords: indicators, monitoring, slippage, alert, optimization.

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación

El presente trabajo de titulación propone una innovadora forma de evaluar el riesgo de deslizamientos en la infraestructura vial en la respectiva cordillera de los andes, basándose en un enfoque preventivo en lugar de reactivo. Excluyendo la dependencia tradicional de los diferentes registros de lluvia para alertar sobre posibles movimientos de masas, especialmente en lugares con áreas geológicamente con un alto grado de complejidad como en el caso nuestro es el Cantón Nabón, donde se ha evidenciado que las precipitaciones no siempre corresponden a fallas aceleradas. La investigación busca identificar las causas subterráneas a través de la correlación de anomalías geofísicas, tales como baja resistividad eléctrica y pérdida de rigidez, con parámetros geotécnicos e hidrogeológicos. **([SGR], 2023)**

El presente enfoque metodológico empleado brinda al área de ingeniería civil una herramienta no destructiva para realizar el diagnostico de inestabilidad de laderas. Con la aplicación del mecanismo de estudio al caso especifico de la vía del Barrio Rosas, se considera la generación de una “Semáforo de alerta temprano” que traduzca el comportamiento del macizo rocoso en medidas preventivas concretas. Además, considerar que los resultados de la investigación pretenden ir más allá del ámbito académico, proporcionando criterios objetivos para optimizar el diseño de obras de mitigación y reducir la vulnerabilidad de las comunidades y la infraestructura en la zona. Esto facilitará decisiones rápidas y efectivas para proteger a la población y minimizar riesgos en situaciones de deslizamientos. (Buñay Zumba A. L., 2023)

1.2. Planteamiento del Problema

La infraestructura vial en la región de los Andes está expuesta a una alta susceptibilidad de movimientos en masa, exacerbada por la variabilidad climática y la presencia de geomateriales volcánicos degradados. En el Ecuador, la Secretaría de Gestión de Riesgos ha identificado zonas críticas en la provincia del Azuay, específicamente en el Cantón Nabón, donde deslizamientos activos amenazan la conectividad vial y la seguridad de asentamientos

humanos consolidados, reportándose eventos recurrentes que han superado la capacidad de respuesta de los métodos de monitoreo tradicionales. **(Cruden, 2023)**

El problema científico radica en la insuficiencia de los sistemas de alerta actuales, los cuales dependen mayoritariamente de umbrales de precipitación regionales que no consideran las condiciones hidrogeológicas locales del sitio. Investigaciones recientes en la región andina señalan que los modelos basados únicamente en la lluvia suelen generar falsas alarmas o fallan al predecir deslizamientos detonados por el ascenso lento del nivel freático, lo que evidencia la necesidad de incorporar variables físicas del subsuelo para mejorar la precisión del pronóstico. **(Álvarez, 2022)**

En el caso específico de la Vía Barrio Rosas, se desconoce cómo interactúan los parámetros geofísicos y geotécnicos para detonar la inestabilidad. A pesar de la existencia de estudios técnicos dispersos, no existe una sistematización que correlacione la resistividad eléctrica o la rigidez sísmica con los niveles de saturación crítica que llevan al suelo a la falla. La falta de estos indicadores técnicos calibrados impide a las autoridades locales tomar decisiones preventivas fundamentadas, manteniendo una gestión del riesgo reactiva y costosa. **(Aguilar, 2025)**

1.3. Pregunta del Problema

¿De qué manera la revisión sistemática y la correlación de indicadores geofísicos, hidrotécnicos y geomecánicos pueden permiten establecer un sistema de alerta confiable para lograr la predicción de deslizamientos concurrentes en la Vía Barrio Rosas, Cantón Nabón?

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Realizar una revisión sistemática de indicadores de alerta temprana para la predicción de deslizamientos y validarlos en el Caso de Estudio Vía Barrio Rosas, Cantón Nabón, Provincia del Azuay, mediante la correlación de la información técnica geofísica y geotécnica del sector.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Diagnosticar el modelo geomecánico del talud vial mediante el análisis de registros de perforación y ensayos de laboratorio existentes, para identificar los estratos de suelo con mayor susceptibilidad a la pérdida de resistencia por saturación.
- Establecer la correlación técnica entre las anomalías geofísicas (zonas de baja resistividad) y los niveles piezométricos reportados, validando la capacidad de la tomografía eléctrica para detectar la acumulación crítica de agua subterránea en el cuerpo del deslizamiento.
- Definir los valores umbrales mediante un Semáforo de Alerta para los indicadores seleccionados, integrando variables de deformación, hidrología y propiedades índice del suelo en una matriz de decisión aplicable a la gestión del riesgo en la vía.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Antecedentes

La inestabilidad de masas (laderas) es una problemática critica en los Andes ecuatorianos. La interacción de suelos residuales, fallas geológicas y el clima ha causado con el pasar de los años deslizamientos constantes, como los documentados históricamente en el cantón Nabón. Para mitigar estos riesgos, a nivel nacional se han comenzado a plantear soluciones tecnológicas preventiva. (Sethy, 2020)

En el ámbito ecuatoriano, se han desarrollado propuestas teóricas para la implementación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) ante deslizamientos, enfocadas principalmente en el uso de placas de hardware libre acopladas a sensores superficiales de precipitación y humedad del suelo para emitir alertas vía SMS. Debemos considerar que este tipo de sistemas (IoT) representan un gran avance tecnológico para la región y el país, en macizos geológicamente complejos como los de Nabón, medir únicamente la lluvia y la humedad superficial resulta insuficiente (Buñay Zumba A. L., 2023)

Esta insuficiencia ha quedado comprobada en los últimos años en el Barrio Rosas, a través de la aplicación de técnicas avanzadas que cambian por completo la forma de abordar el problema: (Buñay Zumba A. L., 2023)

Teledetección satelital (InSAR): Mediante el uso de tecnología de radar con vita en planta desde el espacio, se ha conseguido medir hundimientos de hasta -25.06 cm/año en el Barrio Rosas, perteneciente al cantón Nabón. La determinación más importante de estas mediciones es la demostración estadística de que no existe relación directa entre la lluvia superficial y el movimiento del terreno, confirmando que los pluviómetros o sensores superficiales no bastan para alertar a esta población. (Gordillo Bacuilima, 2023)

Monitoreo cinemático (GPS-GNSS): A través de un mapeo topográfico del deslizamiento, ejecutado con equipos de medición de alta precisión, ha confirmado las rutas exactas y el avance continuo y silencioso de la masa de suelo (Aguilar, 2025)

Exploración profunda (Geofísica y Geotecnia): Según el historial de evidencia de que la tierra se mueve continuamente sin depender de la lluvia, la exploración del subsuelo in situ mediante 31 sondeos eléctricos verticales, sísmica y perforaciones ha detectado potentes estratos de arcillas plásticas y anomalías eléctricas profundas que delatan flujos de agua subterránea ocultos. (Naranjo, 2023)

Los mencionados antecedentes justifican de forma directa el tema y los objetivos de esta investigación: mientras otras propuestas automatizan la lectura superficial, y la tecnología satelital o GPS señala dónde y cuánto se mueve el terreno, solo mediante la correlación de la información técnica geofísica y geotécnica profunda es posible entender por qué (el agua subterránea) y crear indicadores precisos para anticiparse al colapso. (Sethy, 2020)

2.2. Marco Teórico y Conceptual

2.2.1. Marco Teórico

Gestión de riesgo

Es un proceso orientado a la identificación, evaluación y estimación de los riesgos, considerando la probabilidad de que ocurran pérdidas y otros efectos derivados de los desastres. De igual manera, este proceso abarca la aplicación de medidas preventivas, correctivas y de reducción que permitan disminuir sus posibles impactos. (Basabe, (1998))

Por otra parte, el riesgo se considera como el resultado de la interacción entre dos factores fundamentales: la amenaza y la vulnerabilidad. Como por ejemplo cuando ambos elementos coinciden, se genera una condición riesgosa o de riesgo, la cual se manifiesta en la probabilidad de que ocurran daños o pérdidas en un lugar geográfico específico y en un periodo determinado. ([OEA], 2020)

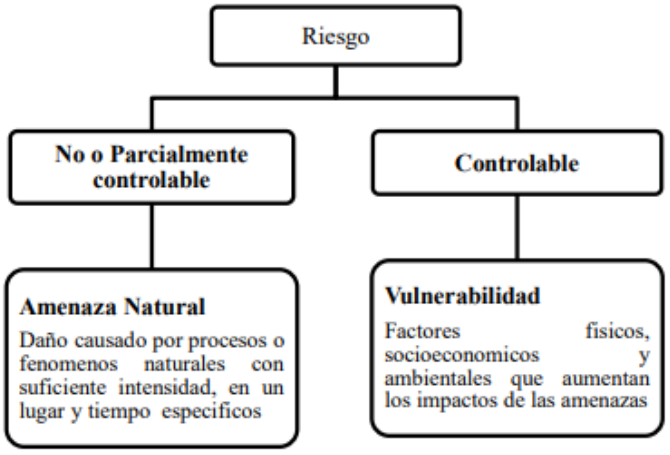


Fig. 1 Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo *(Buñay Zumba A. L., 2023)*

Amenazas naturales

Las amenazas naturales pueden entenderse como aquellos fenómenos o componentes del entorno que representan un peligro para las personas y que se originan por fuerzas ajenas a la acción humana. (Gordillo, 2023)

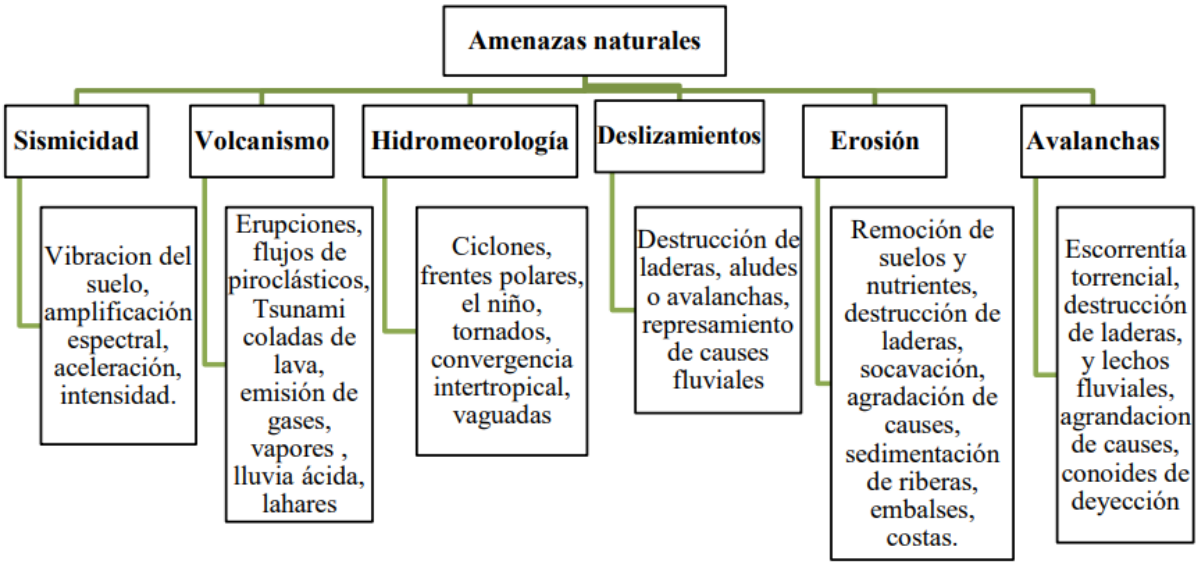


Fig. 2 Amenazas naturales (Buñay Zumba A. L., 2023)

Estabilidad de Taludes

Se evalúa a través del Factor de Seguridad (FS). Si las fuerzas desestabilizadoras (como la presión del agua interna) superan a las fuerzas que retienen el suelo (cohesión y fricción), el FS se acerca a 1.00 y el talud falla. El objetivo analítico es predecir esta caída de resistencia. (Suárez, 2025)

Mecánica de Suelos y Saturación

Las laderas andinas son estables cuando están parcialmente secas gracias a la "succión matricial" (una presión negativa que actúa como pegamento entre las partículas). Bajo el principio de esfuerzos efectivos, cuando el agua subterránea satura los estratos arcillosos, la presión de poros aumenta, esa cohesión aparente desaparece y el suelo pierde su resistencia al corte de forma súbita. (Hatanaka, 2020) (Behpoor, 2020)

Geofísica Aplicada

Considerando la inviabilidad y el alto costo operación para perforar toda la extensión de una ladera, se hace uso de la geofísica como método de escaneo. Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) se rigen por la Ley de Archie, relacionando directamente la baja resistividad con altos niveles de saturación de agua subterránea. Por su parte, la sísmica MASW evalúa la rigidez del terreno; velocidades de onda bajas confirman que el suelo está fracturado y mecánicamente debilitado. (Ulugergerli, 2024)

Falla Progresiva y Velocidad de Deformación

Los taludes en vías o carreteras rara vez fallan de manera instantánea sin previo aviso; generalmente exhiben un comportamiento de "creep" o reptación. La teoría de la falla progresiva establece que existe una fase de aceleración de los desplazamientos antes del colapso. El monitoreo de la velocidad de deformación es, por tanto, el indicador teórico más robusto para predecir deslizamientos en cortes viales. (Das, 2015)

Indicador Hidrometeorológico

Variable externa, generalmente la Intensidad (mm/h) y Duración (h) de la lluvia, utilizada estadísticamente para estimar la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos en un corredor vial, sin medir propiedades del suelo suelo (Juárez, 2025).

Indicador Geotécnico (Físico)

Parámetro que mide la respuesta mecánica directa del terreno. Incluye:

- Desplazamiento (mm): Movimiento acumulado de la masa de suelo.
- Velocidad (mm/día): Tasa de movimiento; un incremento exponencial indica inestabilidad crítica.
- Presión de Poros (kPa): Nivel de agua o presión intersticial dentro del talud

(Behpoor, 2020)

Umbral Crítico de Falla: Valor límite de un indicador a partir del cual la probabilidad de colapso del talud se considera inaceptable para la seguridad de la infraestructura

Efectividad Técnica

Capacidad del sistema de monitoreo para predecir correctamente la inestabilidad, maximizando la tasa de verdaderos positivos y minimizando las interrupciones innecesarias del servicio de transporte (falsas alarmas).

Geotecnia Vial

Rama de la ingeniería civil que estudia el comportamiento de los suelos y rocas en relación con el diseño, construcción y mantenimiento de carreteras, enfocándose en asegurar la estabilidad de cortes, terraplenes y la subrasante. (Das, 2015)

2.2.2. Marco Conceptual

Sistema de Alerta Temprana (SAT):

Es la Integración de instrumentos de medición y modelos de decisión para monitorear un talud y emitir varias alertas preventivas antes de que ocurra un siniestro; las propuestas modernas buscan integrar esta lógica con telemetría para notificaciones automatizadas. (Buñay Zumba A. L., 2023). Son de suma relevancia estos sistemas porque nos da advertencias o prevé de incidentes, que podrían causar la muerte. (Guayaquil, 2021)



Fig. 3 Ciclo del SAT

Indicadores Geofísicos y Geotécnicos: Parámetros como la Resistividad Eléctrica ($\Omega \cdot m$) y el Límite Líquido (LL). El cruce de estos datos permite saber, sin necesidad de destruir el suelo, en qué momento el subsuelo profundo se satura y se vuelve inestable. (Naranjo, 2023)

Validación Cinemática (GPS/InSAR): Uso de satélites y equipos topográficos de precisión para medir el desplazamiento físico de la tierra. ([MIDUVI]., 2014)

Componentes del SAT

A continuación, se identifican los componentes que el SAT nos entrega como información técnica y enriquecedora a la ciudadanía que, en este caso, es la del Barrio Roas del cantón Nabón, provincia del Azuay.

- **Conocimiento de los riesgos:** Consiste en concientizar a la población vulnerable sobre las amenazas de su entorno basándose en evidencia histórica, integrando el saber técnico-científico con la perspectiva comunitaria ([SGR], 2023)
- **Servicio de Seguimiento y Alerta:** Es la vigilancia técnica y constante de las amenazas, operada 24/7 por los Centros de Operaciones de Emergencia. (Guayaquil, 2021)
- **Difusión y comunicación:** Comprende los canales destinados a notificar el peligro a la ciudadanía y autoridades, activando de inmediato los protocolos preventivos a escala local, regional y nacional (Gordillo, 2023)
- **Capacidad de respuesta:** Engloba la preparación integral de autoridades y ciudadanos mediante simulacros, planes operativos y rutas de evacuación, garantizando así la activación inmediata de protocolos para salvaguardar vidas tras emitirse una alerta (Guayaquil, 2021)
- **Aspectos principales para la implementación del SAT**

Estos aspectos se desglosan en 4 partes tales como;

- Institucionalización en normativas
- Designación de comité gestor
- Fusión de cuatro pilares operativos
- Despliegue territorial (nacional a local)
- Conexión directa autoridad-ciudadanía ([SGR], 2023)

Plan de gestión de riesgo

Su integración en la planificación nacional exige respaldo político, normativo y financiero para asignar roles claros bajo el siguiente circuito estratégico:

1) Diagnóstico de amenazas
2) Mitigación del impacto
3) Preparación operativa
4) Blindaje económico
5) Reconstrucción resiliente (Planeamiento, 2021)

Movimiento de masas

Estos fenómenos de remoción en masa, constituyen amenazas geológicas destructivas definidas como el desplazamiento gravitacional de suelos, rocas o rellenos artificiales que comprometen severamente la infraestructura civil. (Terzaghi, 2022)

Caídas

Ocurren cuando bloques de roca o pedazos de suelo se separan de una ladera muy inclinada y caen a gran velocidad. En este proceso, el material puede caer libremente por el aire, rebotar o rodar hasta llegar a la parte baja (Cruden, 2023).

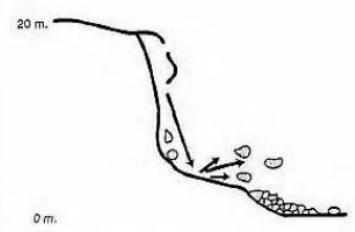


Fig. 4 Caídas

Desplomes

Se desarrollan cuando un bloque de roca o de tierra se inclina y gira hacia adelante sobre un punto de apoyo en su base, como si perdiera el equilibrio. Este movimiento se puede observar comúnmente en terrenos con grietas o cortes verticales profundos, y puede clasificarse en vuelcos de roca, de suelo o de fragmentos mixtos (Sethy, 2020) .

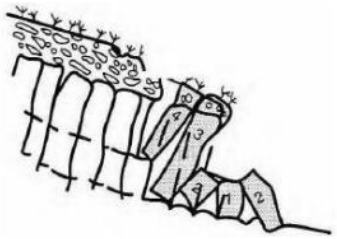


Fig. 5 Desplomes

Deslizamientos

Estos movimientos ladera abajo ocurren sobre una superficie de ruptura identificable por grietas transversales. Según la forma de esta superficie, se dividen en tres categorías principales (Cruden, 2023)

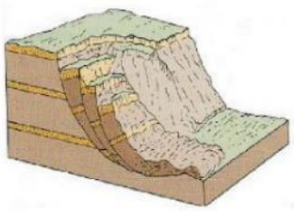


Fig. 6 Deslizamiento

- Rotacionales: Son aquellos desplazamientos que tienen hundimiento con trayectoria curva.
- Traslacionales: es la que surge como movimiento superficial paralelo a la ladera.
- Planos: Es el desplazamiento directo sobre caras lisas. (Cruden, 2023)

Flujos

Los flujos corresponden a movimientos que se desarrollan de manera continua en el espacio, donde las superficies de corte se encuentran muy cercanas entre sí, actúan en un tiempo breve y, por ello, suelen ser complicadas de identificar. Este comportamiento se asemeja al de un flujo viscoso; por esta razón, la velocidad del movimiento no se distribuye de forma uniforme, lo que favorece la aparición de lóbulos debido al predominio del desplazamiento intergranular

Estos movimientos pueden clasificarse según el material involucrado, ya que abarcan distintos tipos de depósitos. En este sentido, es posible distinguir entre flujos de roca, flujos o corrientes de derrubios, y flujos de arena o de suelo (Cruden, 2023)

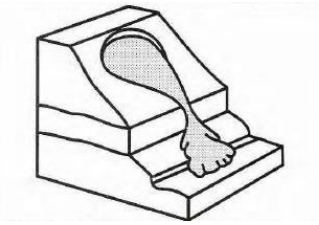


Fig. 7 Flujos (Alcántara, 2000)

Expansiones laterales

Las expansiones laterales se originan por la fracturación y el ensanchamiento de suelos o masas rocosas compactas, como consecuencia de procesos de licuefacción o fluidización en el material que se encuentra por debajo. Este fenómeno suele presentarse en materiales gruesos, como bloques de roca o gravas, que están contenidos dentro de una matriz más fina o asociados con presencia de arcillas. (Buñay Zumba A. L., 2023)

La masa comprometida se desplaza de manera rápida y con comportamiento retrogresivo. Además, la superficie de cizallamiento no suele estar claramente delimitada,

por lo que este tipo de movimiento puede desarrollarse en un intervalo corto, que incluso puede durar solo algunos minutos. (Juárez, 2025)

Muy comúnmente se encuentran en ambientes pantanosos y marítimos, especialmente en zonas ubicadas en los bordes de antiguos casquetes glaciares, como ocurre en regiones costeras de Noruega, Alaska y Canadá. (Das, 2015)

De acuerdo con el material involucrado, las expansiones laterales pueden clasificarse en expansiones laterales en roca, en derrubios y en suelos. (Cruden, 2023)

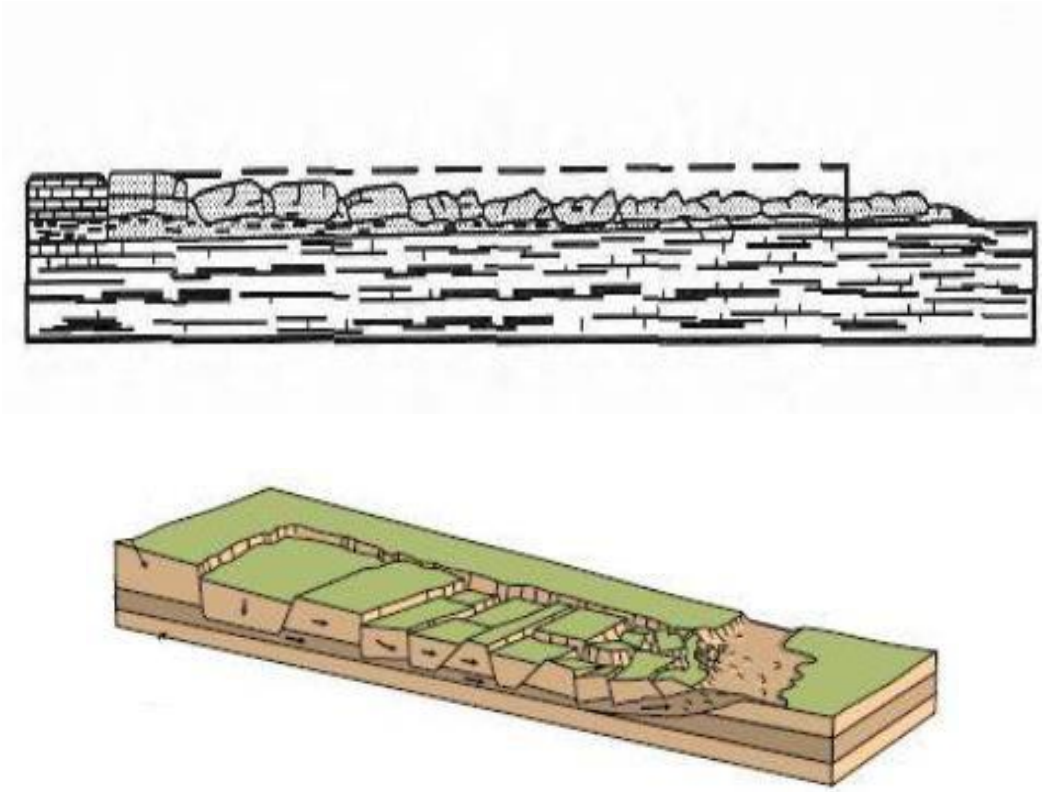


Fig. 8 Expansiones Laterales (Alcántara, 2000)

Movimientos complejos

Se da cuando acontece el desplazamiento inicial cambia del mecanismo conforme avanza pendiente abajo. Dentro de este grupo, destacan principalmente las avalanchas o aludes de roca, así como los flujos asociados a deslizamientos (Cruden, 2023)

Partes de un deslizamiento

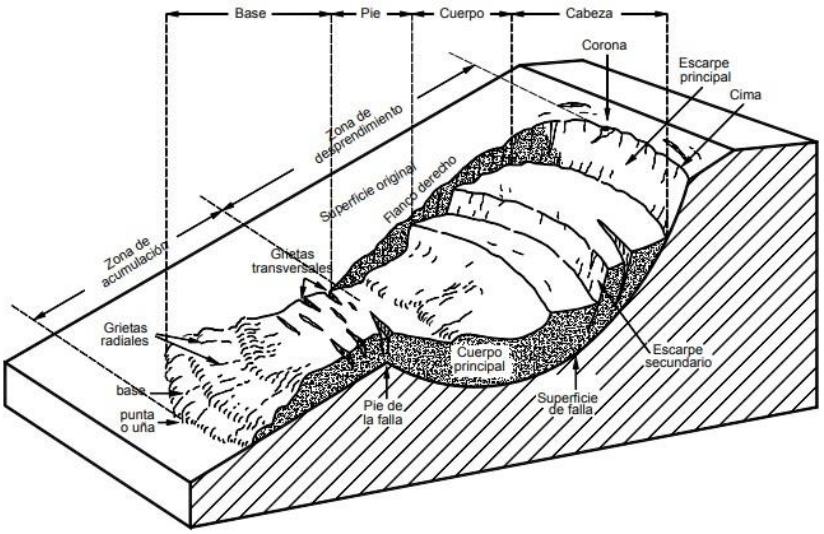


Fig. 9 Partes que conforman un deslizamiento (Suárez, 2012)

Cabeza

Corresponde a la parte superior de la masa de tierra que se está moviendo (no debe relacionarse con el talud). (Buñay Zumba A. L., 2023)

Cima

Es el punto más alto de la cabeza de un deslizamiento, justo en la línea donde la tierra suelta se separa del terreno fijo (Buñay Zumba A. L., 2023)

Corona

Es el material que permanece en el lugar, generalmente en estado inalterado, junto a la parte más alta del escarpe principal y por encima de la cabeza. (Buñay Zumba A. L., 2023)

Escarpe principal

Es la pared casi vertical que queda descubierta en la parte superior trasera cuando la tierra cede; su continuación hacia el interior del subsuelo forma la superficie de falla (Buñay Zumba A. L., 2023).

Escarpe secundario

Son pequeños escalones o cortes empinados que se forman dentro del propio material que ya está resbalando. A partir de un deslizamiento pueden existir provocarse varios secundarios (Ulugergerli, 2024).

Superficie de falla

La zona de estudio de esta falla su movimiento queda por debajo, mismo que a través de la información podemos tener información de volúmenes de todo el material que se haya desplazado. El suelo situado debajo de esta superficie permanece estable, mientras que el que se localiza sobre ella se moviliza. En ciertos casos, el movimiento no presenta una superficie de falla claramente definida (Buñay Zumba A. L., 2023)

Pie de la superficie de falla

Es la línea de intersección entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno; en ocasiones, esta línea no es visible. (Buñay Zumba A. L., 2023)

Base

Es el área ocupada por el material deslizado, localizada por debajo del pie de la superficie de falla. (Buñay Zumba A. L., 2023)

Punta o uña

Es la que representa la parte más baja y frontal del deslizamiento, siendo el extremo de tierra que llega más lejos desde la zona donde inició el derrumbe. (Buñay Zumba A. L., 2023)

Cuerpo principal del deslizamiento

Está conformado por el volumen de tierra o los escombros que se hayan movido, y se ubica directamente sobre la línea de ruptura. (Buñay Zumba A. L., 2023)

Superficie original del terreno

Es la configuración del terreno existente antes de que ocurriera el movimiento. (Buñay Zumba A. L., 2023)

Izquierda y Derecha

En caso de emplear los términos derecha e izquierda para el deslizamiento, estos deben entenderse observando el deslizamiento desde la corona hacia el pie (Buñay Zumba A. L., 2023)

Costado o flanco

Los factores que originan un deslizamiento pueden agruparse en dos categorías principales: los asociados a la intervención humana y los que obedecen a procesos naturales. En la tabla siguiente se presentan dichas causas.

Causas de un deslizamiento

Estos factores que inicialmente se convierten en un deslizamiento pueden agruparse en dos categorías principales: los derivados de la actividad del hombre y aquellos generados por la propia naturaleza, los cuales se detallan a continuación. (Gordillo, 2023)

Tabla 1 *Causas antrópicas de deslizamientos*

F	**Descripción**
Excavaciones	Cuando se mueve tierra para construir casas, escuelas o carreteras, se debilita la base del cerro.
Explosiones	El uso de dinamita en minas o vías crea temblores que rajan las rocas y las dejan flojas.
Sobrecargas por peso.	Poner rellenos, materiales pesados o mucha agua sobre el suelo hace que este ya no aguante la carga.
Actividad minera:	Al sacar materiales de canteras, se cambia la forma de la montaña y se vuelve inestable.

Fuente: (Gordillo, 2023)

Las acciones humanas, al mezclarse con eventos como sismos o lluvias fuertes, suelen empeorar la inestabilidad del terreno, por lo que es vital planificar bien las construcciones y el uso del suelo para evitar tragedias (Kitazume, 2022).

Tabla 2 *Causas naturales de deslizamientos*

Factor	**Descripción**
Geología	Suelos saturados, materiales sueltos o rocas fracturadas facilitan el colapso.
Topografía	A mayor grado de inclinación de la ladera, aumenta el riesgo de
Pluviosidad	La intensidad y persistencia de las lluvias desestabilizan el terreno.
Actividad Sísmica	Las vibraciones por sismos rompen el equilibrio de las masas de tierra.
Actividad	Las erupciones generan movimientos de materiales en los flancos
Deforestación	La pérdida de cobertura vegetal acelera la erosión y la inestabilidad.

Fuente: (Suárez, 2025)

El análisis de los procesos naturales y su relación con la actividad humana es indispensable para el cálculo de amenazas y el diseño de estrategias preventivas (Kitazume, 2022)

Revisión histórica de deslizamientos en Nabón

Tabla- *Deslizamientos en el cantón Nabón*

Fecha	Lugar	Descripción
2018, 2021	Barrio Rosas, Cantón Nabón, Provincia del Azuay.	Debido al macro deslizamiento se produjo la evacuación del sitio, las personas, y las familias afectadas perdieron sus viviendas y cultivos.
	Provincia del Azuay.	Pérdida de vía, terminales.

Ubicación

El área de estudio se ubica en la parroquia Nabón, cantón Nabón de la provincia del Azuay, delimitado dentro de las Coordenadas referenciales UTM WGS84 – 17S: 714327.42/9632071.65; 716102.36/9632071.65; 716102.36/9630466.69; 714327.42/9630466.69 (Figura 2, Anejo 1).

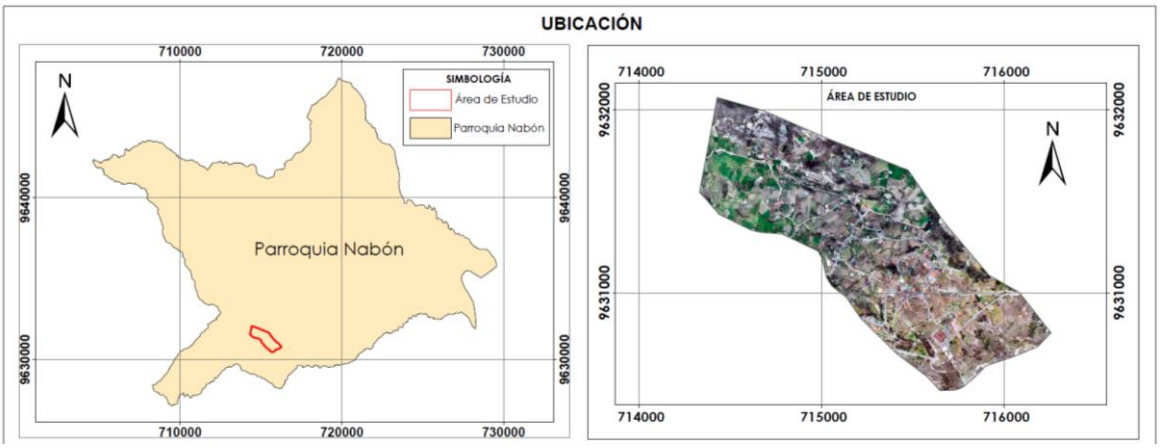


Fig. 10 Ubicación de la zona de estudio

Mapa de niveles freáticos

La profundidad del agua (Napa Freática) en la masa del deslizamiento secundario activado y reactivado, a través del mapa de Niveles Freáticos que se presenta en la figura de a continuación, fue realizado de forma directa con los niveles freáticos determinados en los piezómetros construidos y calicatas y de forma indirecta con los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV15) con un nivel freático aproximado, considerando los materiales litológicos determinados en el sondeo de calibración, en el cual se conoció con certeza tanto el nivel freático como los materiales litológicos saturados de agua subterránea. (GEOPROJECT, 2021)

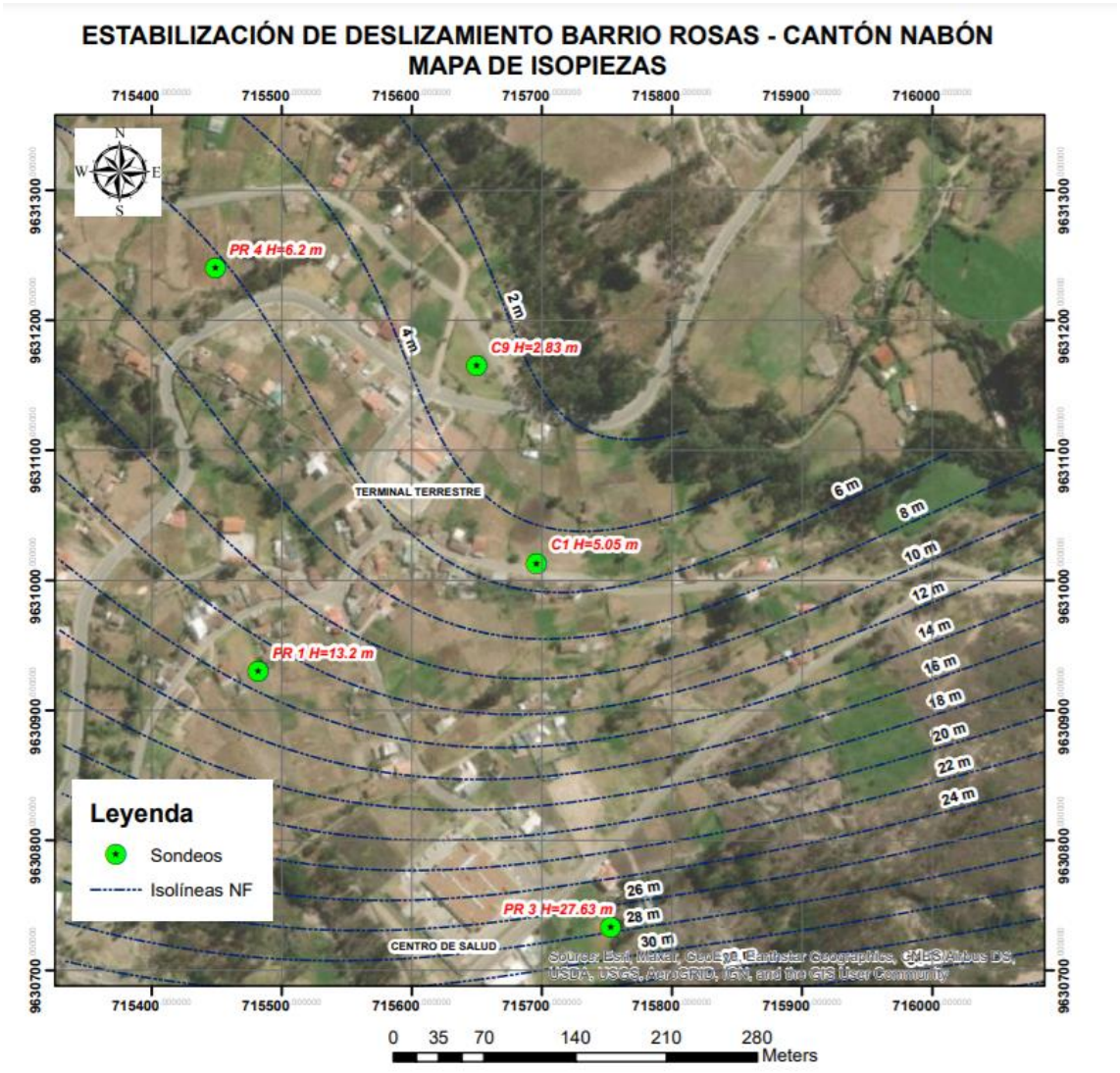


Fig. 11Estabilización de Deslizamiento Barrio Rosas – Cantón Nabón

III. METODOLOGÍA

La parroquia de Nabón enfrenta un gran riesgo en varias zonas, debido a la inestabilidad del terreno, razón por la cual, se procedió en primera instancia a realizar una investigación del terreno, y se analizó información de métodos indirectos de prospección geofísica, utilizando métodos Eléctricos y Sísmicos.

Entre los diferentes métodos eléctricos existen dos los cuales son: Sondeo Eléctrico Vertical (S.E.V) y Tomografía Eléctrica, ambos métodos se basan en analizar el cambio del potencial eléctrico entre diferentes puntos del terreno, con lo cual se logra determinar de forma indirecta los espesores de las unidades geoeléctricas, nivel freático y características eléctricas del subsuelo y al interpretar dichos resultados se puede aproximar los materiales litológicos que lo componen. Sin embargo, los resultados deberán ser comprobados con metodologías directas como perforaciones geotécnicas, las cuales variarán según la profundidad de investigación. (Buñay Zumba A. L., 2023)

Por lo cual se utilizó el método de Sondeo Eléctrico Vertical, el mismo que tendrá especial enfoque en aproximar el nivel freático y espesor de las unidades geoeléctricas.

Dicho método consiste en introducir corriente eléctrica al subsuelo, mediante dos electrodos **A** y **B** llamados electrodos de corriente, los cuales generan ondas de campo eléctrico que se propagan a través del subsuelo cambiando su potencial eléctrico según el material y profundidad; tal cambio de potencial será medido a través de dos electrodos **M** y **N**, llamados electrodos de potencial, los cuales se encargarán de captar el campo eléctrico influenciado por el subsuelo. Ambos electrodos se desplazan horizontalmente y en línea recta, alejándose de forma equidistante desde el Punto **O** en donde se realiza la medida **(*Figura 11*).** La profundidad obtenida es perpendicular a este punto, mediante la relación: a mayor distancia de los electrodos de corriente **A-B**, será mayor profundidad de investigación. (Gordillo Bacuilima, 2023)

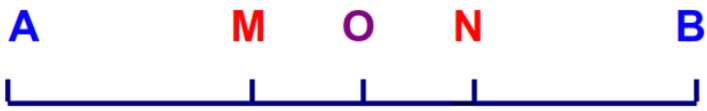


Fig. 12 Diagrama de electrodos de corriente y potencial

La variación del potencial eléctrico dentro del subsuelo estará directamente relacionada con los cambios de resistividad de las formaciones que la componen por estar influenciada en su composición mineralógica, tipo de agua, propiedades físico mecánicas y grado de saturación.

Para la correcta ejecución de los ensayos tendrán que cumplirse tres condiciones:

a) Las diversas formaciones litológicas tienen que ser caracterizadas por diferentes resistividades eléctricas.
b) La corriente eléctrica enviada desde la superficie, debe penetrar con profundidad hasta alcanzar los objetivos que se hayan propuesto investigar.
c) Las deformaciones del campo eléctrico o perturbaciones al recorrido de la corriente por las heterogeneidades del subsuelo, deben ser medibles a partir de la superficie.

(Gordillo, 2023)

3.1. Tipo de Estudio

La presente investigación se enmarca en un enfoque estrictamente cuantitativo. El trabajo se sustenta en la recopilación, procesamiento matemático y validación de variables físicas continuas extraídas del subsuelo y la superficie del cantón Nabón. Manejamos datos medibles y objetivos, tales como la resistividad eléctrica en Ohmios-metro (Ω•m), las velocidades de onda sísmica en metros por segundo (m/s), el desplazamiento del terreno en milímetros (mm) y los coeficientes adimensionales de seguridad. (Behpoor, 2020)

El diseño metodológico adoptado es de corte no experimental. En ningún momento manipulamos deliberadamente las variables del suelo en un ambiente controlado de laboratorio; por el contrario, evaluamos las condiciones estratigráficas, las anomalías de humedad y la cinemática del macizo in situ, exactamente tal como reaccionan en la naturaleza frente a sus agentes detonantes. (GEOPROJECT, 2021)

Finalmente, el estudio posee un alcance correlacional. El propósito central no es simplemente describir el suelo, sino cuantificar y demostrar científicamente el grado de asociación que existe entre lo que nos dicen las lecturas geofísicas (saturación y debilidad profunda) y la deformación topográfica real que termina destruyendo el talud. (GEOPROJECT, 2021)

3.2. Técnicas

Para construir el modelo predictivo, no realizamos nuevas perforaciones invasivas, sino que estructuramos nuestra base de datos a partir de un análisis documental exhaustivo. Extrajimos e interpretamos las métricas de un vasto banco de pruebas ejecutadas previamente en la zona cero de la emergencia, dividiendo las técnicas de recolección en tres frentes fundamentales: (Behpoor, 2020)

Técnicas de Prospección Geofísica (Exploración Indirecta)

Procesamos e interpretamos los registros de 31 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), los cuales alcanzaron profundidades de escaneo de hasta 133 metros para detectar el agua subterránea oculta. Esto se complementó con la lectura de 4 líneas de Sísmica de Refracción (MASW) de 55 metros de longitud, utilizadas para obtener los perfiles de velocidad de corte y entender qué tan fracturada estaba la roca (GEOPROJECT / GEOSOIL, 2021).

Técnicas de Exploración Geotécnica (Método Directo)

Analizamos la litología de 4 perforaciones a roto-percusión que alcanzaron los 43 metros de profundidad, revisando sus ensayos de laboratorio (Límites de Atterberg, Consolidación y Triaxial). Un elemento clave de esta técnica fue la extracción de los registros de 3 piezómetros de tubo abierto, que nos dieron la profundidad exacta del nivel freático para cruzarla con la geofísica. (GEOPROJECT, 2021)

Técnicas de Monitoreo Cinemático (Topografía y Teledetección)

Para validar que nuestras sospechas sobre el subsuelo eran correctas, integramos los datos topográficos recientes derivados del rastreo del deslizamiento con equipos GPS-GNSS de alta precisión, los cuales nos marcaron la ruta y velocidad exacta a la que se está moviendo la superficie de la ladera (Aguilar & Bustamante, 2025; Gordillo & Segarra, 2023).

3.3. Operacionalización de variables

Para garantizar el rigor analítico al momento de cruzar la información y construir el Semáforo de Alerta Temprana, operacionalizamos las variables de estudio de la siguiente manera:

Categoría	Nombre de la Variable	Dimensión Conceptual	Indicador y Unidad de Medida	Herramienta / Técnica
Independiente	Resistividad Eléctrica Verdadera	Capacidad del subsuelo para oponerse a la corriente; actúa como un indicador clave del grado de saturación por agua.	Ohmios por metro (Ω•m)	Prospección Geofísica: Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)
Independiente	Velocidad de Onda de Corte (Vs30)	Parámetro que define la rigidez dinámica, la compacidad y el grado de fracturamiento interno del material.	Metros por segundo (m/s)	Prospección Geofísica: Sísmica de Refracción (MASW)

Independiente	Profundidad del Nivel Freático (Zw)	Cota superior que marca el inicio de la zona de saturación total de agua subterránea dentro de la ladera.	Metros lineales (m) desde la superficie	Exploración Directa: Piezometría de tubo abierto
Independiente	Límite Líquido (LL) y Humedad Natural	Punto de humedad en el que las arcillas pierden su estado plástico y comienzan a fluir como un líquido viscoso.	Porcentaje (%) / Índice de Liquidez	Ensayos de Laboratorio: Límites de Atterberg
Dependiente	Estabilidad del Talud y Deformación	Grado de seguridad de la masa de tierra y su manifestación física en forma de desplazamiento activo.	Factor de Seguridad (Adimensional) / Desplazamiento (mm)	Modelación Matemática en software / Monitoreo GPS-GNSS

Tabla 1 Operacionalización de variables *(GEOPROJECT, 2021)*

3.4. Fases de ejecución

- **Fase 1: Recopilación y Sistematización**

Consistió en la depuración y sistematización de los parámetros físicos obtenidos de las perforaciones y calicatas. El objetivo fue identificar los estratos exactos de arcilla que presentan mayor susceptibilidad a plastificarse con el agua. Posteriormente, simulamos el comportamiento del terreno en un software de Equilibrio Límite para observar matemáticamente cómo cae el Factor de Seguridad cuando el suelo se satura (GEO-SLOPE International Ltd., 2012).

- **Fase 2: Análisis Correlacional.**

Esta fue la etapa nuclear del estudio. Procesamos la data geofísica (los perfiles SEV y MASW) y la cruzamos espacialmente con los niveles de agua detectados por los piezómetros y con las rutas de deformación marcadas por los equipos GPS. Esto nos permitió comprobar que las anomalías subterráneas (zonas de bajísima resistividad) coinciden milimétricamente con los puntos donde la ladera sufre sus mayores rupturas en la superficie. ([MIDUVI]., 2014)

- **Fase 3: Integración y Diseño del Sistema de Alerta**.

Basándonos en las correlaciones comprobadas en la fase anterior, definimos los rangos críticos (umbrales) para cada indicador. El producto final de esta fase fue estructurar nuestra matriz operativa o "Semáforo de Alerta Temprana", traduciendo los datos complejos de la geofísica en un protocolo de toma de decisiones directas y preventivas para las autoridades locales. (GEOPROJECT, 2021)

IV. RESULTADOS

A partir del procesamiento de los datos de campo, la exploración del subsuelo y la modelación matemática, se obtuvieron resultados contundentes que permiten estructurar el sistema de alerta temprana. Los hallazgos se dividen en el diagnóstico físico del suelo, la correlación de variables y el diseño final de la matriz operativa. **(GEOPROJECT, 2021)**

Diagnóstico Geomecánico del Talud y Estabilidad

El análisis de los 80 metros lineales de perforación a roto-percusión (PR-1 a PR-4) evidenció que la inestabilidad de la Vía Barrio Rosas está gobernada por una estratigrafía muy desfavorable. El subsuelo está compuesto por potentes depósitos coluviales superpuestos a la Formación Picota, intercalados con estratos finos de alta plasticidad. En la Figura de a continuación se evidencia la disposición morfológica de estos depósitos geológicos sobre la zona poblada.



Fig. 13 disposición morfológica de estos depósitos geológicos sobre la zona poblada

Los ensayos de laboratorio revelaron el punto crítico de estos materiales. En la corona del deslizamiento (PR-1, estrato de 13.00 a 13.50 m de profundidad), la arcilla (CH) registró un Límite Líquido (LL) alarmante del 76.90% y una humedad natural del 43.83% (GEOPROJECT, 2021). Las deformaciones físicas producto de esta debilidad geomecánica son visibles en la superficie a través de agrietamientos tensionales severos y la formación de escarpes (ver Figura). (GEOPROJECT, 2021)

Deslizamiento Rosas (DR)

Se trata de un deslizamiento antiguo de centenas o miles de años desde su generación, cuya masa se encontraba en estado latente, es decir, en estabilidad precaria; hasta que las condiciones de su estabilidad cambiaron, como consecuencia de la actividad humana (carga impuesta), y condiciones naturales (Sismos, agua superficial, hipodérmica y subterránea). (GEOPROJECT, 2021)

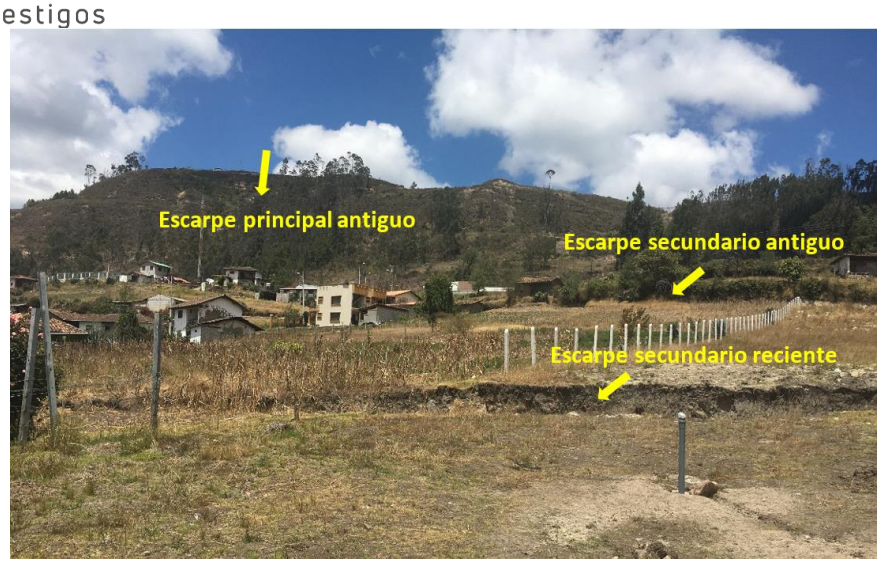


Fig. 14 Evidencia física de la cinemática de falla: Escarpes principales y secundarios activos en el Barrio Rosas.

Actualmente en la masa del deslizamiento antiguo, se activaron y se reactivaron deslizamientos secundarios codificados como DR1 y DR2 que están afectando 131 viviendas y obras de infraestructura: vial, sanitaria, eléctrica y telecomunicación entre otras.

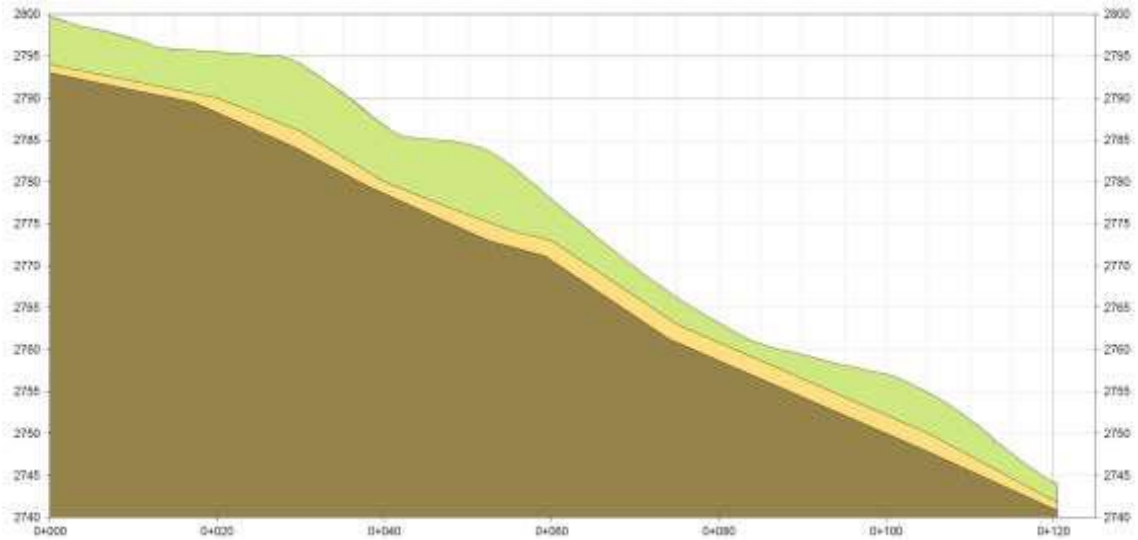
Deslizamiento DR1.

Deslizamiento secundario activado en la masa del antiguo deslizamiento en los primeros meses del presente año (Ilustración 3-5), cuyo escarpe principal secundario tiene una altura de 0,60 metros y 604 metros de largo aproximadamente, ubicado en las coordenadas referenciales 715472,15E/9630906,29N (WGS 84). Dentro de la masa de este deslizamiento, se concentra la mayor densidad poblacional del Barrio Rosas y con mayor actividad de movimiento. El pie de este deslizamiento se encuentra en las coordenadas referenciales 715263E/9631092N.

Deslizamiento DR2.

Se trata de un deslizamiento reactivado en el flanco derecho del deslizamiento antiguo que se encuentra en la primera fase de reactivación con una velocidad de movimiento baja pero que puede tomar una aceleración importante debido a la pendiente del terreno. (Varnes, 2024)

Para determinar cómo este nivel de saturación afecta al macizo, se analizaron los parámetros geomecánicos del Perfil 8, el cual corresponde exactamente al corte transversal más crítico del macrodeslizamiento del Barrio Rosas (ver Figura).



Estratos Perfil Geotécnico 8	Peso específico	cohesión	fricción
	kN/m3	kPa	°
E3	17.95	4.903	26
E4	18.44	194	44
E5	16.77	9.81	21

Fig. 15 Perfil Estratigráfico transversal (Slope)

Las propiedades de resistencia al corte (cohesión y fricción) y pesos específicos obtenidos de los ensayos de laboratorio (Corte Directo y Triaxial TXUU ejecutados en los sondeos PR-1, PR-4 y C-1 de este barrio) se resumen en la **Tabla.**

Tabla 2. Parámetros Geomecánicos de entrada para la Modelación (Perfil Crítico 8).

Estrato Litológico (SUCS)	Peso Específico γ (kN/m³)	Cohesión c (kPa)	Ángulo de Fricción ϕ (°)	Origen del Dato
Estrato 3 (GP - Grava)	17.95	4.90	26°	Ensayo Corte Directo (PR-1 a 9.00m)
Estrato 4 (Roca Clase IV)	18.44	194.00	44°	Ensayo Triaxial TXUU (PR-4 a 11.30m)
Estrato 5 (ML - Limo)	16.77	9.81	21°	Ensayo Corte Directo (C-1)

Tabla 2 Datos extraídos y procesados de la campaña de exploración.

Al trasladar estos parámetros geomecánicos a un software computacional especializado en Estabilidad de Taludes por Equilibrio Límite 2D (SLOPE/W), se evaluó la sensibilidad del macizo ante la presión del agua.

Los resultados matemáticos de las iteraciones computacionales (Tabla 4) confirmaron el colapso teórico. En condiciones estáticas normales (drenadas), el Factor de Seguridad (FS) del talud presenta un equilibrio precario. Sin embargo, al simular la saturación del perfil, el FS se desploma drásticamente, cruzando el límite de rotura (FS < 1.00) y justificando la reactivación de las masas de tierra.

Tabla 3. Resultados de la Modelación Matemática de Estabilidad en SLOPE/W (Perfil 8 - Barrio Rosas).

Escenario de Modelación	Condición Hidrogeológica	Factor de Seguridad (FS)	Estado de la Ladera
Escenario 1 (Actual)	Estático Drenado	**1.13**	Equilibrio precario
Escenario 2 (Saturado)	Estático No Drenado (Nivel freático elevado)	**0.56**	**Colapso Inminente**
Escenario 3 (Sismo)	Pseudo-Estático	**0.77**	Falla por aceleración sísmica

Tabla 3 Resultados de la Modelación Matemática de Estabilidad (Equilibrio Límite)

Correlación Geofísica, Piezométrica y Cinemática

Para evitar la perforación continua de la ladera, se validó la eficacia de la geofísica como método predictivo. El cruce espacial entre los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), los piezómetros y el monitoreo topográfico arrojó las siguientes correlaciones directas:

- **Detección de Saturación Crítica:** La inversión de los SEV demostró que las resistividades inferiores a 10.00 Ω•m son el indicador exacto de arcillas plastificadas. Como se observa en los perfiles de resistividad aparente, en la zona de mayor daño, los sondeos SEV-1 y SEV-2 marcaron 6.54 y 6.05 Ω•m. Al verificar con el piezómetro

en ese mismo punto, se confirmó que el nivel freático estaba aflorando a escasos 2.83 metros de la superficie.

- **Detección de Acuíferos Confinados:** En el escarpe antiguo (SEV 25), resistividades sostenidas de 30 Ω•m revelaron un flujo subterráneo profundo, confirmado por la perforación PR-3 que detectó agua a 27.00 metros, evidenciando cómo se alimenta el deslizamiento desde el interior.
- **Pérdida de Rigidez Dinámica:** La sísmica MASW registró velocidades de onda de corte (Vs30) bajísimas, de entre 168 y 248 m/s, clasificando al macizo como un suelo severamente fracturado y ablandado. (Behpoor, 2020)

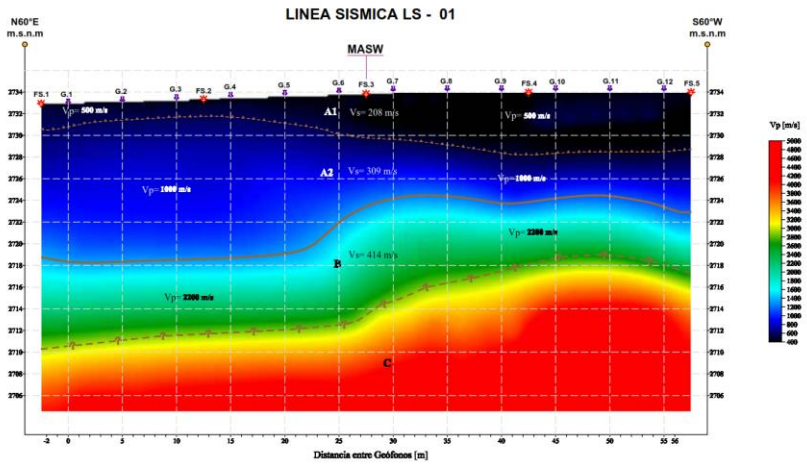


Fig. 16 Ilustración 3-1. Perfil sísmico LS – 01, Barrio Rosas

- A continuación, se describen los complejos sísmicos encontrados en la exploración geofísica:
- **Complejo Sísmico A1.-** Toba con matriz arena limosa, color café, presenta clastos esporádicos, poco consolidada, con un espesor variable de 3.00 a 7.00 metros, velocidades Vp promedio de 500 m/s y Vs 208 m/s.
- **Complejo Sísmico A2.-** Toba con matriz arena limosa, color café, presenta clastos esporádicos, poco consolidada, con un espesor variable de 4.00 a 12.00 metros, velocidades Vp promedio de 1000 m/s y Vs 309 m/s.

- **Complejo Sísmico B.-** Lutita poco meteorizada, fracturada, color gris a crema, con un espesor variable de 5.00 a 8.00 metros, velocidades Vp promedio de 2200 m/s y Vs 414 m/s.
- **Complejo Sísmico C.-** Lutita poco meteorizada, consolidada, color crema, con un espesor no definido.
- El valor Vs30 = 354 m/s, corresponde a un perfil de suelo rígido tipo D, según la definición en la norma NEC-SE-DS 15
- **Comprobación Cinemática (GPS):** Las zonas donde la geofísica detectó estas anomalías (agua profunda y baja rigidez) coincidieron milimétricamente con las rutas de mayor aceleración y desplazamiento superficial mapeadas por los equipos GPS-GNSS de alta precisión en 2025.

Matriz de Alerta Temprana (Semáforo Geotécnico)

Consolidando las correlaciones anteriores, se estructuró la siguiente herramienta operativa. Esta matriz traduce los parámetros complejos del subsuelo en acciones directas de mitigación.

Tabla 4. Semáforo de Alerta Temprana Geotécnico - Vía Barrio Rosas.

Nivel de Alerta	Resistividad Eléctrica Promedio (Ω•m)	Profundidad del Nivel Freático	Factor de Seguridad (FS) y Estado Cinemático	Acción Operativa Recomendada
VERDE (Estable)	> 20.00 (Ω * m)	> 15.00 metros (Acuífero profundo)	**FS > 1.20** / Vectores GPS estables	Tránsito normal. Mantenimiento y desazolve rutinario de subdrenes y cunetas.
AMARILLO (Precaución)	10.00 a 20.00 (Ω * m)	5.00 a 15.00 metros (Acumulación de agua)	**FS 1.00 - 1.20** / Inicio de deformación "creep"	**Restricción preventiva de tráfico pesado.** Aumento de la capacidad de bombeo en pozos de extracción.
ROJO (Falla Inminente)	**< 10.00** (Ω * m)	**< 5.00 metros** (Saturación superficial extrema)	**FS < 1.00** / Aceleración de desplazamiento GPS	**Cierre total de la vía.** Evacuación preventiva obligatoria de infraestructura expuesta.

Tabla 4 Semáforo de Alerta Temprana Geotécnico

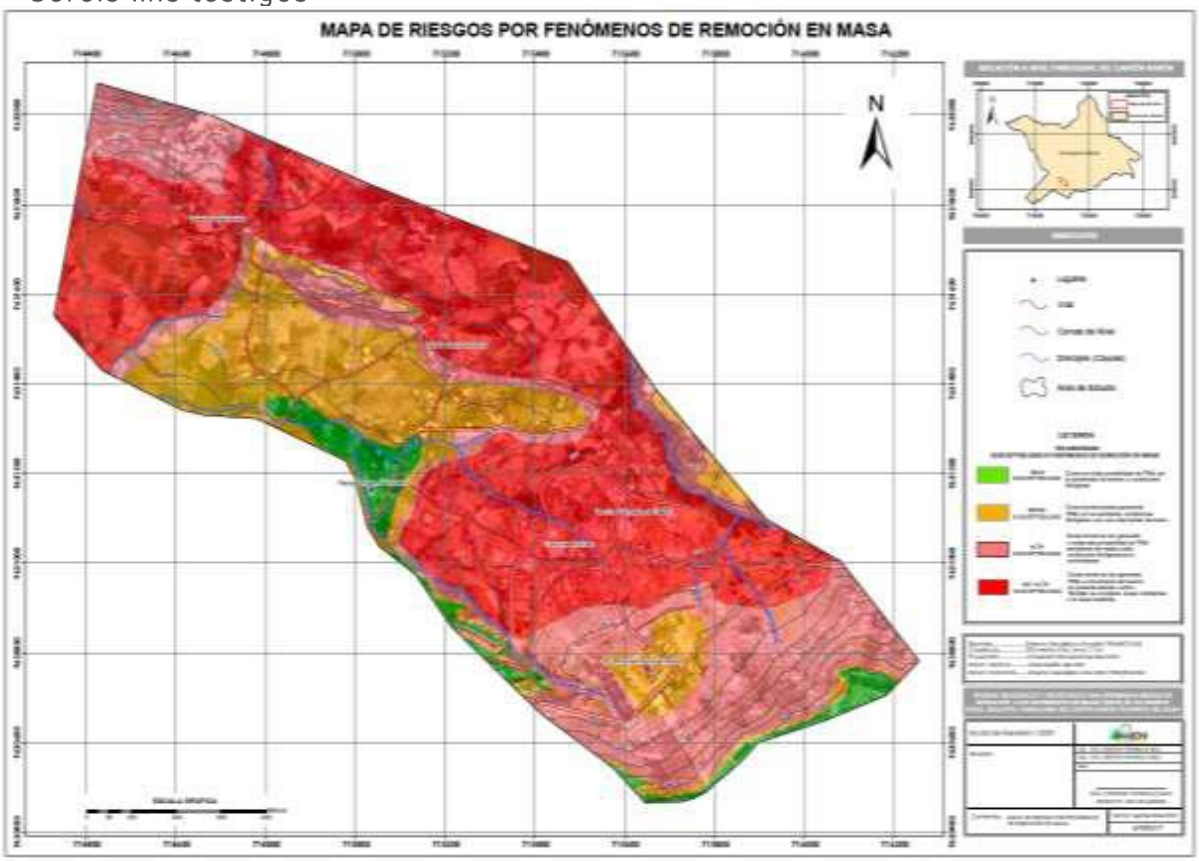


Fig. 17 Mapa de Riesgos

Finalmente es importante indicar que, si bien se han caracterizado zonas de baja y media

susceptibilidad, el nivel de amenaza pudiera variar en el orden ascendente; es decir, de baja a alta o de media a alta susceptibilidad, si no existe una correcta canalización de las aguas de escorrentía o si se realiza acciones antrópicas sin criterio técnico.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Discusión

La gestión del riesgo en la infraestructura vial del Ecuador ha operado tradicionalmente bajo un paradigma reactivo o, en el mejor de los casos, utilizando modelos preventivos basados exclusivamente en variables climáticas superficiales. Los resultados tabulados en esta investigación demuestran la urgente necesidad de cambiar este enfoque. Se ha comprobado cuantitativamente que la correlación de métodos geofísicos y parámetros

de resistencia al corte permite definir umbrales de alerta significativamente más precisos, atacando el problema de raíz . (Buñay Zumba A. L., 2023)

Para dimensionar el valor de estos hallazgos, es imperativo contrastarlos con el panorama científico actual. A nivel nacional, existen propuestas valiosas orientadas a la automatización de alertas, que se basan en su efectividad en hardware IoT acoplado a pluviómetros y sensores de humedad superficial. Si bien este tipo de sistemas son útiles para eventos de escorrentía rápida o flujos de lodo poco profundos, los resultados de modelación de la Tabla 4 evidencian que, para deslizamientos de gran magnitud (macrodeslizamientos andinos), la lectura superficial resulta analíticamente ciega ante el verdadero peligro: la presión de poros subterránea (Buñay Zumba A. L., 2023)

Esta insuficiencia de los datos superficiales queda ratificada por las recientes mediciones de teledetección satelital InSAR ejecutadas en la misma zona de estudio. Gordillo y Segarra (2023) documentaron tasas de subsidencia críticas de hasta -25.06 cm/año, pero su análisis estadístico concluyó tajantemente que no existe una relación directa entre las lluvias y la aceleración del terreno. Al descartar a la precipitación como detonante directo, los resultados de la caracterización (ver Tabla 3) toman total relevancia: se comprobó empíricamente que el colapso de la estabilidad obedece de manera exclusiva a la saturación profunda del macizo. El agente destructor no proviene de una tormenta superficial inmediata, sino que percola y se embalsa silenciosamente en acuíferos internos. (GEOPROJECT, 2021)

Es aquí donde el uso de la Geofísica Aplicada, sustentada en la Ley de Archie, marca un punto de inflexión técnico. Nuestro estudio comprobó que las anomalías conductivas extremas (< 10 Ω•m) son capaces de predecir y mapear con exactitud la ubicación tridimensional de napas freáticas aflorantes (a 2.83 metros de profundidad) mucho antes de que se presenten grietas inelásticas en la calzada. La altísima fiabilidad de este diagnóstico geoeléctrico queda avalada de manera irrefutable por la cinemática de superficie: los mapeos con equipos GPS-GNSS de alta precisión (Aguilar & Bustamante, 2025) corroboraron que los

vectores de mayor desplazamiento activo ocurren, sin excepción, sobre los polígonos donde la geofísica detectó niveles críticos de saturación y pérdida de rigidez dinámica (Vs30 < 250 m/s). (José Guamán, 2024)

El Semáforo de Alerta Temprana estructurado en este trabajo constituye una herramienta, fundamentada en parámetros físicos medibles obtenidos mediante modelación en SLOPE/W. Demuestra fehacientemente que la única vía factible para anticipar el desastre, salvaguardar vidas y proteger las futuras y millonarias obras de mitigación proyectadas para el cantón (sistemas de subdrenes y muros anclados), es el monitoreo continuo del comportamiento hidrogeológico del subsuelo profundo (José Guamán, 2024)

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

Se determinó de forma categórica que la inestabilidad de la Vía Barrio Rosas está orquestada por la meteorización de los depósitos coluviales y la alta plasticidad de sus estratos base. Las perforaciones evidenciaron arcillas de alta compresibilidad (CH) con Límites Líquidos letales para la ingeniería (76.90%). La modelación matemática demostró que este material, al saturarse internamente, abate el Factor de Seguridad de la ladera desde un precario equilibrio (FS=1.13) hasta el colapso estructural definitivo (FS=0.56), confirmando que la pérdida de resistencia al corte por presión de poros es el mecanismo de rotura.

Ante la ineficiencia comprobada de los indicadores pluviométricos, se validó exitosamente que la exploración geofísica actúa como el precursor predictivo más exacto. Se estableció una correlación matemática impecable entre las anomalías de resistividad eléctrica extrema y la presencia de napas freáticas aflorantes in situ (a escasos 2.83 m de profundidad). La pérdida de rigidez detectada por la sísmica entre 168 y 248 m/s) coincide geoespacialmente con las rutas de movimiento destructivo mapeadas y avaladas por la tecnología GPS-GNSS de superficie, demostrando que el subsuelo avisa antes de que la superficie colapse.

Se cristalizó el diseño de una matriz operativa (Semáforo de Alerta Temprana) que dinamita el paradigma tradicional dependiente del clima. Al amalgamar el umbral de resistividad mínima tolerable, la cota de asfixia del nivel freático y el derrumbe del Factor de Seguridad, esta matriz justifica científicamente decisiones críticas, operativas y logísticas, desde la orden de aumentar el bombeo en los pozos hasta el imperativo legal de paralizar el tráfico vehicular y evacuar de emergencia.

6.2. Recomendaciones

Se recomienda que se implemente una red telemétrica automatizada (IoT) para el monitoreo hidrogeológico y cinemático del macizo. Para ello, se debe instalar una batería de piezómetros de cuerda vibrante en perforaciones profundas, sincronizados con estaciones GNSS de operación continua (CORS). Configurar estas estaciones con tasas de muestreo subdiarias permitirá correlacionar en tiempo real los incrementos en la presión de poros con los vectores de desplazamiento, activando las alarmas estructurales de manera automática.

También se recomienda que se ejecuten perentoriamente las obras de estabilización física proyectadas, priorizando como mecanismo principal el abatimiento del nivel freático. Es imperativo proceder con la perforación de galerías filtrantes (subdrenes profundos) y la activación de los pozos de bombeo de 50 metros de profundidad. Solo mediante la extracción del agua confinada se logrará restituir el esfuerzo efectivo del suelo, incrementando la resistencia al corte basal para devolver el Factor de Seguridad a un umbral estático superior a 1.20.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía

[MIDUVI]., M. d. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-15): Geotecnia y Diseño de Cimentaciones. Gobierno de la República del Ecuador.* Obtenido de https://online.portoviejo.gob.ec/docs/nec6.pdf

[OEA], O. d. (2020). *Manual sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación del Desarrollo Regional.* Obtenido de https://www.oas.org/dsd/publications/unit/oea65s/oea65s.pdf

[SGR], S. d. (2023). *Informe de zonas críticas por movimientos en masa en la provincia del Azuay, Cantón Nabón. Gobierno de la República del Ecuador.* Obtenido de https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/02/Informe-de-Situacion-No-009-Nabon_31012023-1.pdf

Aguilar, M. &. (2025). *Modelación de la ruta de un deslizamiento activo mediante GPS y análisis de riesgo geotécnico, en el sector Rosas del Cantón Nabón [Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]. Cuenca, Ecuador.* Obtenido de https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/31271

Álvarez, M. (2022). *Caracterización de muestras inalteradas del Delta del Llobregat [Trabajo de grado/máster, Universidad Politécnica de Cataluña].* Obtenido de https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/ea8a1f05-7484-493c-8229-1a274f63f04e/content

Basabe, P. ((1998)). *royecto PRECUPA: “Prevención de Desastres Naturales en la cuenca del río Paute”.* Obtenido de https://www.academia.edu/6041639/Prevenci%C3%B3n_y_mitigaci%C3%B3n_de_desastres_en_la_cuenca_del_Paute

Behpoor, L. &. (2020). *Correlation of SPT to strength and modulus of elasticity of cohesive soils. Shiraz University.* Obtenido de https://www.issmge.org/publications/publication/correlation-of-spt-to-strength-and-modulus-of-elasticity-of-cohesive-soils

Buñay Zumba, A. L. (2023). *Propuesta teórica de un Sistema de Alerta Temprana ante deslizamientos en la ciudad de Riobamba [Trabajo de titulación, Universidad Nacional de Chimborazo]. Riobamba, Ecuador.* Obtenido de http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/11871

Buñay Zumba, A. L. (2023). *UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO.* Obtenido de Riobamba.

Cruden, D. M. (2023). *Landslide types and processes. En A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), Landslides: Investigation and mitigation (pp. 36-75). Transportation Research Board.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/269710331_CrudenDMVarnes_DJ1996_Landslide_Types_and_Processes_Transportation_Research_Board_US_National_Academy_of_Sciences_Special_Report_247_36-75

Das, B. M. (2015). *Fundamentos de ingeniería geotécnica (4ta ed.). Cengage Learning Editores.* Obtenido de https://www.studocu.com/es-mx/document/instituto-tecnologico-de-durango/alcantarillado-y-saneamiento/fundamentos-de-ingenieria-low-1-issuu/17689413

GEOPROJECT. (2021). *Estudios geológicos geotécnicos para determinar medidas de mitigación a los movimientos de masas (suelo) de los barrios: Rosas, Bellavista, Tamboloma del cantón Nabón, provincia del Azuay. Informe Técnico - Consultoría. GAD Municipal del Cantón Nabón.*

Gordillo Bacuilima, L. E. (2023). *Aplicación de técnicas de teledetección para el monitoreo de desplazamientos en el barrio las Rosas, cantón Nabón provincia del Azuay* . Obtenido de https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/e98537ba-8012-4003-ae71-6ffa6a221feb

Gordillo, L. &. (2023). *Aplicación de técnicas de teledetección para el monitoreo de desplazamientos en el barrio las Rosas, cantón Nabón provincia del Azuay. [Trabajo de titulación, Universidad de Cuenca]. Cuenca, Ecuador.* Obtenido de https://dspace.ucuenca.edu.ec/items/e98537ba-8012-4003-ae71-6ffa6a221feb

Guayaquil, M. d. (2021). *Manual del Comité de Operaciones de Emergencias. Scretaría de Gestión de Riesgos.* Obtenido de https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/09/Manual-del-COE.pdf

Hatanaka, M. &. (2020). *Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils. Japanese Geotechnical Society.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080620318011

José Guamán, O. C. (2024). *Geovisor implementation for visualization of geodynamic and geomorphological properties of the subsoil: Case study Cuenca, Azuay, Ecuador. Catholic University of Cuenca, Av. Américas y Humbolt, CP. 010101, Cuenca, Ecuador.* Obtenido de https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2024/08/matecconf_wmcaus2023_19004.pdf

Juárez, E. &. (2025). *Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Editorial LIMUSA, México.* Obtenido de https://es.scribd.com/doc/283548277/Mecanica-de-Suelos-Juarez-Badillo-y-Rico-Rodriguez

Kitazume, M. (2022). *The Sand Compaction Pile Method. Port and Airport Research Institute, Yokosuka, Japan. A.A. Balkema Publishers.* Obtenido de https://feismo.com/doc-viewer-v3

Naranjo, H. &. (2023). *álculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional. El caso del puente sobre el río Maicito. Universidad Politécnica Salesiana.* Obtenido de https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6133/1/calculo%20de%20capacidad%20portante%20basado%20en%20geofisica%20y%20metodo%20convencional.pdf

Planeamiento, S. d. (2021). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca.* Obtenido de https://www.cuenca.gob.ec/system/files/2%20-%20INFORME%20PDOT_VISION%20Y%20LINEAMIENTOS_0.pdf

Sethy, B. (2020). *Load Carrying Capacity of Eccentrically Loaded Shallow Rectangular Foundation on Granular Soils. National Institute of Technology, Rourkela.* Obtenido de http://ethesis.nitrkl.ac.in/6394/1/E-9.pdf

Suárez, J. (2025). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Instituto de Investigaciones de Erosión y Deslizamientos, Bucaramanga, Colombia.* Obtenido de https://www.academia.edu/8925280/DESLIZAMIENTOS_Y_ESTABILIDAD_DE_TALUDES_EN_ZONAS_TROPICALES

Terzaghi, K. (. (2022). *Mechanism of Landslides. Geological Society of America.* Obtenido de https://es.scribd.com/document/509939934/Terzaghi-1950-En

Ulugergerli, E. &. (2024). *Statistical Correlations Between Seismic Wave Velocities and SPT Blow Count and the Relative Density of Soils. Journal of Testing and Evaluation, 35(2), ASTM International.* Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/249958795_Statistical_Correlations_Between_Seismic_Wave_Velocities_and_SPT_Blow_Counts_and_the_Relative_Density_of_Soils

Varnes, D. J. (2024). *Landslide types and processes. Highway Research Board Special Report 29.* Obtenido de https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf

VIII. ANEXOS

A continuación, se adjunta la documentación técnica, cartográfica y de laboratorio que fundamenta el análisis correlacional, la modelación geomecánica y la estructuración del Semáforo de Alerta Temprana desarrollados a lo largo de la presente investigación. Toda la información base ha sido recopilada, depurada y sistematizada a partir de los estudios técnicos ejecutados en la zona de estudio del Barrio Rosas.

Anexo 1: Registros de Prospección Geofísica del Macizo

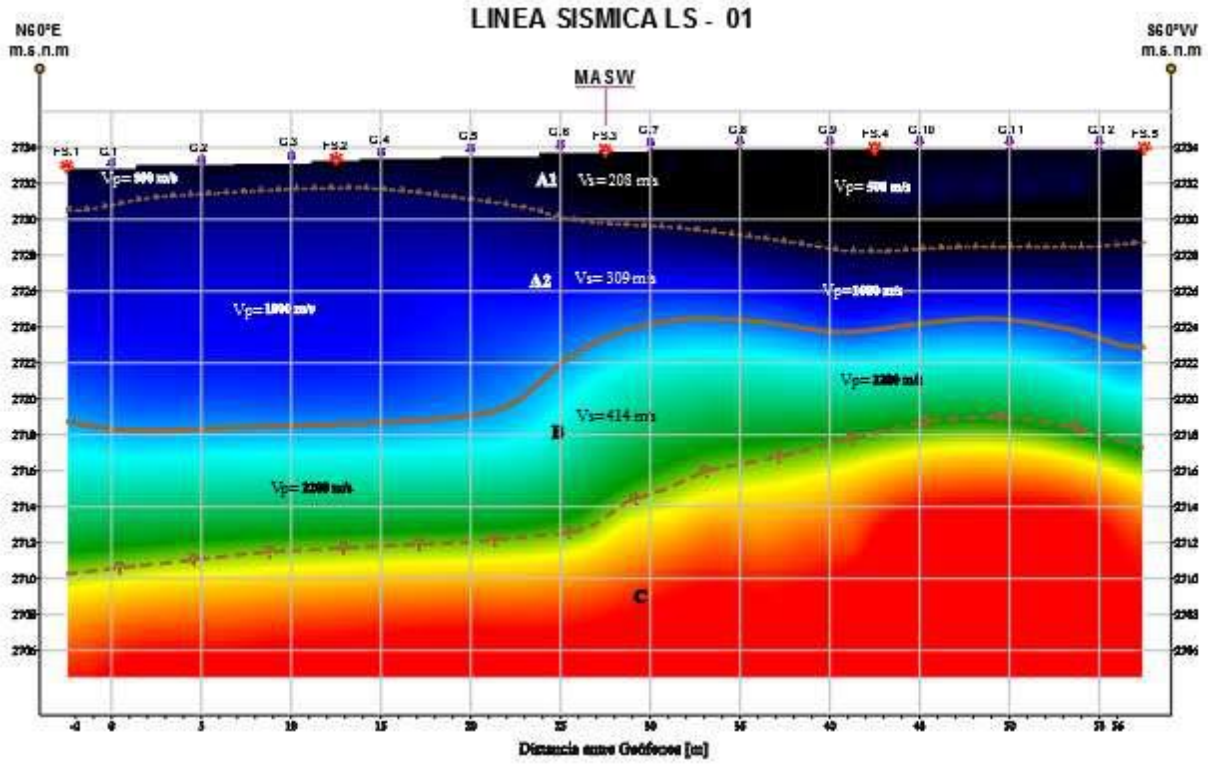
- A1.1. Perfiles de inversión de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV-1, SEV-2, SEV-25).

Tabla 3.2. Ubicación de sondeos eléctricos verticales.

Código	UTM WGS84 Coordenada ZONA-ESTE-NORTE	Altitud m.s.n.m	Fecha	Lugar
SEV 1	17 M 715662 9631174	2738,35	29/7/2021	Barrio Rosas
SEV 2	17 M 715661 9631163	2739,29	29/7/2021	Barrio Rosas
SEV 3	17 M 715675 9631093	2746,97	29/7/2021	Barrio Rosas
SEV 4	17 M 715698 9631030	2755,35	29/7/2021	Barrio Rosas
SEV 5	17 M 715712 9630979	2766,09	30/7/2021	Barrio Rosas
SEV 6	17 M 715676 9630901	2787,49	30/7/2021	Barrio Rosas
SEV 7	17 M 715750 9630852	2796,28	30/7/2021	Barrio Rosas
SEV 8	17 M 715727 9630903	2791,33	30/7/2021	Barrio Rosas
SEV 9	17 M 715485 9630919	2767,66	30/7/2021	Barrio Rosas
SEV 10	17 M 715505 9630873	2774,14	31/7/2021	Barrio Rosas
SEV 11	17 M 715490 9630902	2769,98	31/7/2021	Barrio Rosas
SEV 12	17 M 715277 9631470	2732,00	31/7/2021	Barrio Tamboloma
SEV 13	17 M 715258 9631251	2706,30	31/7/2021	Barrio Tamboloma
SEV 14	17 M 715202 9631234	2702,46	31/7/2021	Barrio El Rosario
SEV 15	17 M 715063 9631059	2701,85	31/7/2021	Barrio El Rosario
SEV 16	17 M 715453 9631226	2734,77	31/7/2021	Barrio Rosas
SEV 17	17 M 715407 9631327	2719,19	1/8/2021	Barrio Tamboloma
SEV 18	17 M 715484 9631413	2712,00	1/8/2021	Barrio Tamboloma
SEV 19	17 M 715268 9631050	2738,04	1/8/2021	Barrio Rosas
SEV 20	17 M 715031 9631388	2709,63	1/8/2021	Barrio Tamboloma
SEV 21	17 M 714952 9631484	2710,34	1/8/2021	Barrio Tamboloma
SEV 22	17 M 714845 9631518	2713,65	1/8/2021	Barrio Tamboloma
SEV 23	17 M 714643 9631581	2702,19	1/8/2021	Barrio Bellavista
SEV 24	17 M 714572 9631593	2697,77	1/8/2021	Barrio Bellavista
SEV 25	17 M 715780 9630713	2811,60	2/8/2021	Barrio Rosas
SEV 26	17 M 715736 9630827	2797,36	2/8/2021	Barrio Rosas
SEV 27	17 M 715735 9630766	2799,11	2/8/2021	Barrio Rosas
SEV 28	17 M 715708 9630821	2795,91	2/8/2021	Barrio Rosas
SEV 29	17 M 715634 9630935	2774,84	2/8/2021	Barrio Rosas
SEV 30	17 M 715778 9631101	2746,62	2/8/2021	Barrio Rosas
SEV 31	17 M 715290 9631268	2708,33	2/8/2021	Barrio Tamboloma

Anexo. 1 A1.1. Perfiles de inversión de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV-1, SEV-2, SEV-25).

- A1.2. Perfil geo-sísmico de velocidades de onda de corte MASW (Línea LS-01, Barrio Ros



Anexo. 2 Perfil geo-sísmico de velocidades de onda de corte MASW (Línea LS-01, Barrio Rosas).

Anexo 2: Exploración Geotécnica y Ensayos de Laboratorio

- A2.1. Registros estratigráficos de las perforaciones a roto-percusión (Sondeos PR-1 a PR-4) y reportes de nivel piezométrico.

SONDEO	UBICACIÓN	NORTE	ESTE	ALTURA (m.s.n.m)	PROFUNDIDAD (m)
PR-1	Cabecera o Corona del deslizamiento	9630930	715482	2766.69	17.50
PR-2	Cabecera o Corona en el extremo derecho del deslizamiento	9630979	715738	2766.32	10.50
PR-3	En la parte superior del deslizamiento	9630733	715753	2802.84	43.00
PR-4	Pie del deslizamiento	9631240	715449	2730.71	19.00

Anexo. 3 Registros estratigráficos de las perforaciones a roto-percusión (Sondeos PR-1 a PR-4) y reportes de nivel piezométrico.

LECTURA DE NIVELES DE AGUA		
UBICACIÓN	**SONDEO**	**LECTURA PROMEDIO**
Cabeza del deslizamiento secundario reactivado	PR-1	13.70
Cabeza del deslizamiento principal	PR-3	27.00
Pie del deslizamiento secundario reactivado	PR-4	6.80

Anexo. 4 Niveles Piezometro

- A2.2. Certificados de ensayos de laboratorio de Mecánica de Suelos: Límites de Atterberg, Granulometría, Humedad Natural.

CUADRO RESUMEN ENSAYOS DE LABORATORIO													
CALICATA	PROF.	LIMITES ATTERBERG			HUMEDAD	GRANULOMETRÍA			Corte Directo			SUCS	DESCRIPCIÓN
		LL	LP	IP	Natural (%)	% de Grava	% de Arena	% de Finos(Pasa No, 200)	P. Específico	Cohesión	A. Fricción		
	m	(%)	(%)	(%)					(kg/m3)	kg/cm2	°		
C1	5,00	34,11	24,81	9,3	33,43	0	47	53	1710	0,1	21	ML	Limo inorgánicos de baja compresibilidad
C2	3,40	51,15	38,17	12,98	18,33	0	15	85				MH	Limos inorgánicos de alta compresibilidad
C7	3,50	48,97	28,73	20,24	33,26	0	44	56				ML	Limo inorgánicos de baja compresibilidad
C8	3,80	30,77	26,01	4,76	21,5	0	60	40				SM	Arena Limosa
C9	3,70	29.47	25.85	3.62	18.29	0	63	37	1700	0,12	25	SM	Arena limosa
C10	3,80	47,66	22,7	24,96	27,19	0	43	57				CL	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad
C11	3,00	45,5	25,21	20,29	25,43	0	25	75	1660	0,24	12	CL	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad
C12	3,50	28,79	18,22	10,57	23,25	0	30	70	1600	0,25	10	CL	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad
C13	3,50	44,27	30,97	13,3	28,01	0	32	68	1760	0,11	26	ML	Limo inorgánicos de baja compresibilidad
C14	3,50	33,16	26,72	6,44	20,37	0	45	55	1740	0,12	22	ML	Limo inorgánicos de baja compresibilidad
C15	3,50	31,75	27,1	4,65	22,99	0	39	61	1720	0,14	20	ML	Limo inorgánicos de baja compresibilidad
C16	3,50	46,52	32,55	13,97	28,3	0	38	62	1700	0,1	22	ML	Limo inorgánicos de baja compresibilidad

Anexo. 5 Cuadro Resumen Ensayos de Laboratorio - Parámetros físicos y geomecánicos de las calicatas

- A2.3. Ensayos de resistencia al corte: Corte Directo y Triaxial (TXUU).

CUADRO RESUMEN ENSAYOS DE LABORATORIO																			
PERF.	PROF.	LIMITES ATTERBERG		HUMEDAD	GRANULOMETRÍA			Corte Directo			Triaxial UU			C. Simple			Clasificación		Clasificación
	m	LL (%)	IP (%)	Natural (%)	% de Grava	% de Arena	% de Finos(Pasa No, 200)	ɣ (kg/m3)	c kg/cm2	Ø °	ɣ (kg/m3)	c kg/cm2	Ø °	ɣ (kg/m3)	q kg/cm2	c kg/cm2	SUCS	Descripción	Bienawski
1	4,00-4,50	35,59	12,58	29,8	0	26	74										CL	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad	
	5,20-5,50	35,29	8,27	30,8	0	46	54										ML	Limos inorgánicos de baja compresibilidad	
	7,00-8,00	31,48	8,21	57,61	0	83	17										SC	Arena Arcillosa	
	9,00-9,50*	NP	NP	16,58	49	47	4	1832	0,05	26							GP	Grava mal graduada	
	10,20	58,02	18,96	33,74	0	18	82										MH	Limos inorgánicos de alta compresibilidad	
	11,20	NP	NP	28,62	0	72	28	1735	0,1	22							SM	Arena Limosa	
	13,00-13,50	76,9	40,62	43,83	0	3	97							1793	0,72	0,36	CH	Arcilla inorgánica de alta compresibilidad	
	17,50										1670	0,35	28	1675	1,051	0,53			Roca Clase IV (Mala)
2	4,00-4,50	33,78	9,9	31,05	0	26	74							1736	1,6	0,8	CL	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad	
	5,60	44,41	18,35	40,78	25	22	53				1770	0,3	6				CL	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad	
	9,30	44,27	19,56	32,94	11	56	33										SC	Arena Arcillosa	
	10,00-10,50	45,15	15,23	41,61	0	35	65							1741	1,32	0,66	ML	Limos inorgánicos de baja compresibilidad	
3	2,40	35.98	11.97	32.77	0	20	80							1652	1.23	0.62	CL	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad	
	7,20	34,97	16,15	19,49	0	28	72				1800	1,8	30						Roca Clase IV (Mala)
	11,00-12,00	31,18	7,99	25,09	0	39	61	1721	1,26	59				1813	9,041	4,52			Roca Clase IV (Mala)
	13,20	41,51	15,42	27,27	0	28	72	1812	0,05	29									Roca Clase IV (Mala)
	23,40	29,62	12,49	22,14	0	34	66				1820	1,5	42	1826	6,61	3,31			Roca Clase IV (Mala)
4	3,70-4,80	31,43	10,17	33,24	0	42	58										CL	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad	
	7,80	28.79	7.57	29.36	0	47	53							1639	1.84	0.92	CL	Arcilla inorgánica de baja compresibilidad	
	11,30	41.33	15.32	17.26	0	55	45				1880	1,98	44						Roca Clase IV (Mala)
	12,60													1908	14,10	7,05			Roca Clase IV (Mala)
	14,60-15,20	47,29	19,63	14,69	6	83	11										SP-SC	Arena mal graduada con arcilla	
	17,00-18,00	59,54	30,58	30,59	0	6	94							1851	1,91	0,96			Roca Clase IV (Mala)

Anexo. 6 Cuadro de Resumen

- A2.3. Ensayos de resistencia al corte: Corte Directo y Triaxial (TXUU).

Perforación	Profundidad(m)	SUCS	Relación de vacíos inicial (e0)	Relación de vacíos final (ef)	Presión de preconsolidación (kg/cm2)	Cc	Cs
PR-1	5,5	ML	1,03	0,36	2,1	0,467	0,018
PR-2	5,6	CL	1,24	0,45	2,6	0,763	0,064
PR-3	7,6	CL	0,91	0,16	2,7	0,681	0,009
PR-4	3,7	CL	1,26	0,92	2,4	0,278	0,01
C11	3.0	CL	1.32	0.71	1,8	0.485	0.021
C14	3.0	ML	1.02	0.68	2.4	0.333	0.027

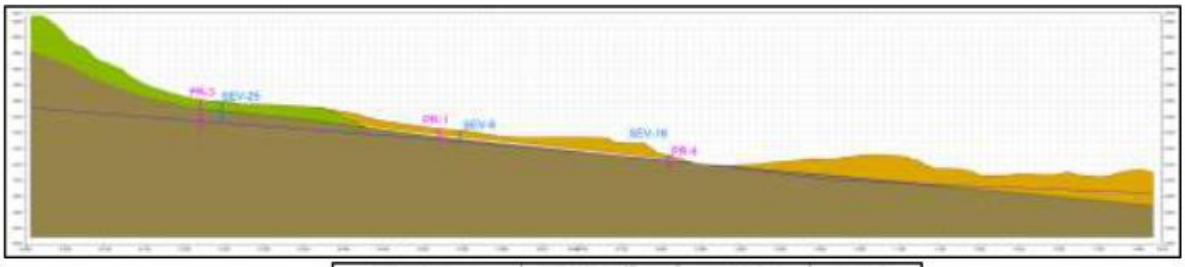
Anexo. 7 Resumen de ensayos de Consolidación

Anexo 3: Reporte de Modelación Matemática de Estabilidad

- A3.1. Salidas gráficas del software de Equilibrio Límite 2D (SLOPE/W) para el Perfil Crítico 8.
- A3.2. Superficies de falla y Factores de Seguridad para condiciones estáticas, saturadas y pseudo-estáticas.

Perfil 1

ESTRATO 1	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: ML	Parámetros tomados de compresión simple PR-3 a 2.40m
Ángulo de Fricción (Ø °) = -	
Cohesión (c) = 60.79 kPa	
Peso Específico (Y) = 16.21 kN/m³	
ESTRATO 2	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: CL	Parámetros tomados de Triaxial TXUU PR-2 a 5.60m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 6°	
Cohesión (c) = 29.42 kPa	
Peso Específico (Y) = 17.36 kN/m³	
ESTRATO 3	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: GP	Parámetros tomados de Corte Directo PR-1 a 9.00m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 26°	
Cohesión (c) = 4.90 kPa	
Peso Específico (Y) = 17.95 kN/m³	
ESTRATO 4	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
Bienwski: Roca Clase IV (Mala)	Parámetros tomados de Triaxial TXUU PR-1 a 17.50m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 28°	
Cohesión (c) = 34.32	
Peso Específico (Y) = 16.38 kN/m³	

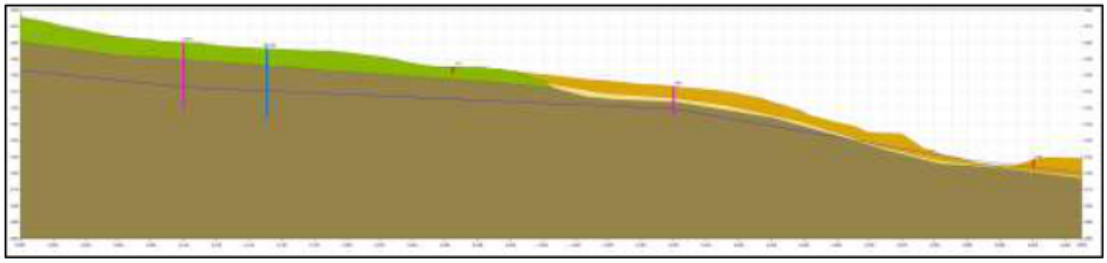


Estratos Perfil Geotécnico 1	Peso específico	cohesión	fricción
	kN/m3	kPa	°
E1	16.21	60.79	-
E2	17.36	29.418	6
E3	17.95	4.903	26
E4	16.38	34.321	28

Perfil 2

ESTRATO 1	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: ML	Parámetros tomados de compresión simple PR-3 a 2.40m
Ángulo de Fricción (Ø °) = -	
Cohesión (c) = 60.79 kPa	
Peso Específico (Y) = 16.21 kN/m³	
ESTRATO 2	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: CL	Parámetros tomados de Triaxial TXUU PR-2 a 5.60m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 6°	
Cohesión (c) = 29.42 kPa	
Peso Específico (Y) = 17.36 kN/m³	
ESTRATO 3	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: GP	Parámetros tomados de Corte Directo PR-1 a 9.00m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 26°	
Cohesión (c) = 4.90 kPa	
Peso Específico (Y) = 17.95 kN/m³	
ESTRATO 4	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
Bienawski: Roca Clase IV (Mala)	Parámetros tomados de Triaxial TXUU PR-1 a 17.50m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 28°	
Cohesión (c) = 34.32	
Peso Específico (Y) = 16.38 kN/m³	

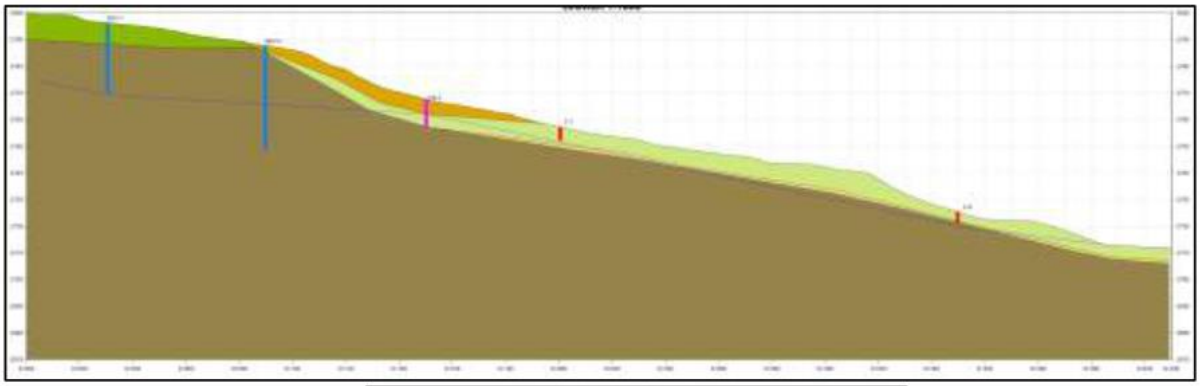
Ilustración 4.2. Perfil Geotécnico 2



Estratos Perfil Geotécnico 1	Peso específico	cohesión	fricción
	kN/m3	kPa	°
E1	16.21	60.79	-
E2	17.36	29.418	6
E3	17.95	4.903	26
E4	16.38	34.321	28

Perfil 3

ESTRATO 1	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: CL	Parámetros tomados de compresión simple PR-3 a 2.40m
Ángulo de Fricción (Ø °) = -	
Cohesión (c) = 60.79 kPa	
Peso Específico (Y) = 16.21 kN/m³	
ESTRATO 2	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: CL	Parámetros tomados de Compresión Simple PR-2 a 4.50m
Ángulo de Fricción (Ø °) = -	
Cohesión (c) = 78.45 kPa	
Peso Específico (Y) = 17.06 kN/m³	
ESTRATO 3	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: GP	Parámetros tomados de Corte Directo PR-1 a 9.00m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 26°	
Cohesión (c) = 4.90 kPa	
Peso Específico (Y) = 17.95 kN/m³	
ESTRATO 4	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
Bienawski: Roca Clase IV (Mala)	Parámetros tomados de Triaxial TXUU PR-4 a 11.30m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 44°	
Cohesión (c) = 194	
Peso Específico (Y) = 18.44 kN/m³	
ESTRATO 5	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: ML	Parámetros tomados de Corte Directo C-1
Ángulo de Fricción (Ø °) = 21°	
Cohesión (c) = 9.81	
Peso Específico (Y) = 16.77 kN/m³	

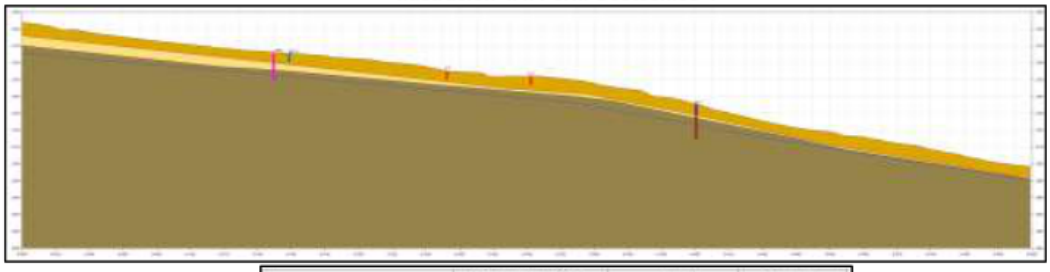


Estratos Perfil Geotécnico 3	Peso específico	cohesión	fricción
	kN/m3	kPa	°
E1	16.21	60.79	-
E2	17.06	78.45	-
E3	17.95	4.903	26
E4	18.44	194	44
E5	16.77	9.81	21

Perfil 4

ESTRATO 2	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: CL	Parámetros tomados de Triaxial TXUU PR-2 a 5.60m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 6°	
Cohesión (c) = 29.42 kPa	
Peso Específico (Y) = 17.36 kN/m³	
ESTRATO 3	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: GP	Parámetros tomados de Corte Directo PR-1 a 9.00m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 26°	
Cohesión (c) = 4.90 kPa	
Peso Específico (Y) = 17.97 kN/m³	
ESTRATO 4	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
Bienawski: Roca Clase IV (Mala)	Parámetros tomados de Triaxial TXUU PR-1 a 17.50m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 28°	
Cohesión (c) = 34.32	
Peso Específico (Y) = 16.38 kN/m³	

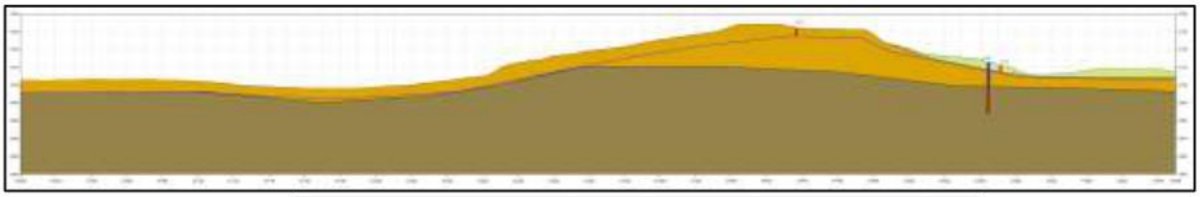
Ilustración 4.4. Perfil Geotécnico 4



Estratos Perfil Geotécnico 4	Peso específico kN/m3	cohesión kPa	fricción °
E2	17.36	29.418	6
E3	17.97	4.90	26
E4	16.38	34.32	28

Perfil 5

ESTRATO 2	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: CL	Parámetros tomados de corte directo C-11
Ángulo de Fricción (Ø °) = 12°	
Cohesión (c) = 23.53 kPa	
Peso Específico (Y) = 16.28 kN/m³	
ESTRATO 4	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
Bienawski: Roca Clase IV (Mala)	Parámetros tomados de Triaxial TXUU PR-1 a 17.50m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 28°	
Cohesión (c) = 34.32 kPa	
Peso Específico (Y) = 16.38 kN/m³	
ESTRATO 5	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: ML	Parámetros tomados de corte directo C-13
Ángulo de Fricción (Ø °) = 26°	
Cohesión (c) = 10.78	
Peso Específico (Y) = 17.26 kN/m³	

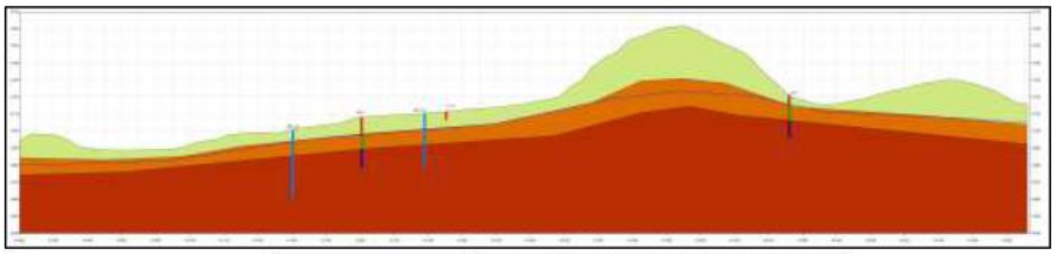


Estratos Perfil Geotécnico 5	Peso específico kN/m3	cohesión kPa	fricción °
E2	16.28	23.53	12
E5	17.26	10.78	26
E4	16.38	34.32	28

Perfil 6

ESTRATO 5	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: ML	Parámetros tomados de corte directo C-14
Ángulo de Fricción (Ø °) = 22	
Cohesión (c) = 11.76 kPa	
Peso Específico (Y) = 17.06 kN/m³	
ESTRATO 6	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
Bienawski: Roca Clase IV (Mala)	Parámetros tomados de informe geofísico, línea LS-02 Complejo A2 Correlaciones utilizadas: Peso específico (Osman Uyanick): $\gamma = 3.1x\ Vp^{0.25}$ (Ulugergerli, E. 2007) Ángulo de fricción (Dunham): $Ø = (12N)^{0.5} + 25$ (Naranjo, H. 2012)
Ángulo de Fricción (Ø °) = 32°	
Cohesión (c) = -	
Peso Específico (Y) = 16.87 kN/m³	
ESTRATO 7	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
Bienawski: Roca Clase IV (Mala)	Parámetros tomados de informe geofísico, línea LS-02 Complejo B Correlaciones utilizadas: Peso específico (Osman Uyanick): $\gamma = 3.1x\ Vp^{0.25}$ (Ulugergerli, E. 2007) Ángulo de fricción (Dunham): $Ø = (12N)^{0.5} + 25$ (Naranjo, H. 2012)
Ángulo de Fricción (Ø °) = 40°	
Cohesión (c) = -	
Peso Específico (Y) = 18.34 kN/m³	

Ilustración 4.6. Perfil Geotécnico 6

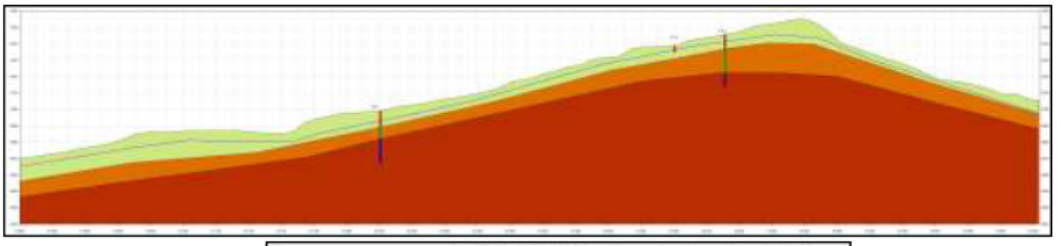


Estratos Perfil Geotécnico 6	Peso específico kN/m3	cohesión kPa	fricción °
E5	17.06	11.76	22
E6	16.87	-	32
E7	18.34	-	40

Perfil 7

ESTRATO 5	
Parámetros Geomecánicos	**Parámetros Geomecánicos**
SUCS: ML	Parámetros tomados de corte directo C-15
Ángulo de Fricción (Ø °) = 20°	
Cohesión (c) = 13.72 kPa	
Peso Específico (Y) = 16.87 kN/m³	
ESTRATO 6	
Parámetros Geomecánicos	**Parámetros Geomecánicos**
Bienawski: Roca Clase IV (Mala)	Parámetros tomados de informe geofísico, línea LS-03 Complejo A2 Correlaciones utilizadas: Peso específico (Osman Uyanick): $\gamma = 3.1x\ Vp^{0.25}$ (Ulugergerli, E. 2007) Ángulo de fricción (Dunham): $Ø = (12N)^{0.5} + 25$ (Naranjo, H. 2012)
Ángulo de Fricción (Ø °) = 31°	
Cohesión (c) = -	
Peso Específico (Y) = 16.77 kN/m³	
ESTRATO 7	
Parámetros Geomecánicos	**Parámetros Geomecánicos**
Bienawski: Roca Clase IV (Mala)	Parámetros tomados de informe geofísico, línea LS-03 Complejo B Correlaciones utilizadas: Peso específico (Osman Uyanick): $\gamma = 3.1x\ Vp^{0.25}$ (Ulugergerli, E. 2007) Ángulo de fricción (Dunham): $Ø = (12N)^{0.5} + 25$ (Naranjo, H. 2012)
Ángulo de Fricción (Ø °) = 37°	
Cohesión (c) = -	
Peso Específico (Y) = 17.65 kN/m³	

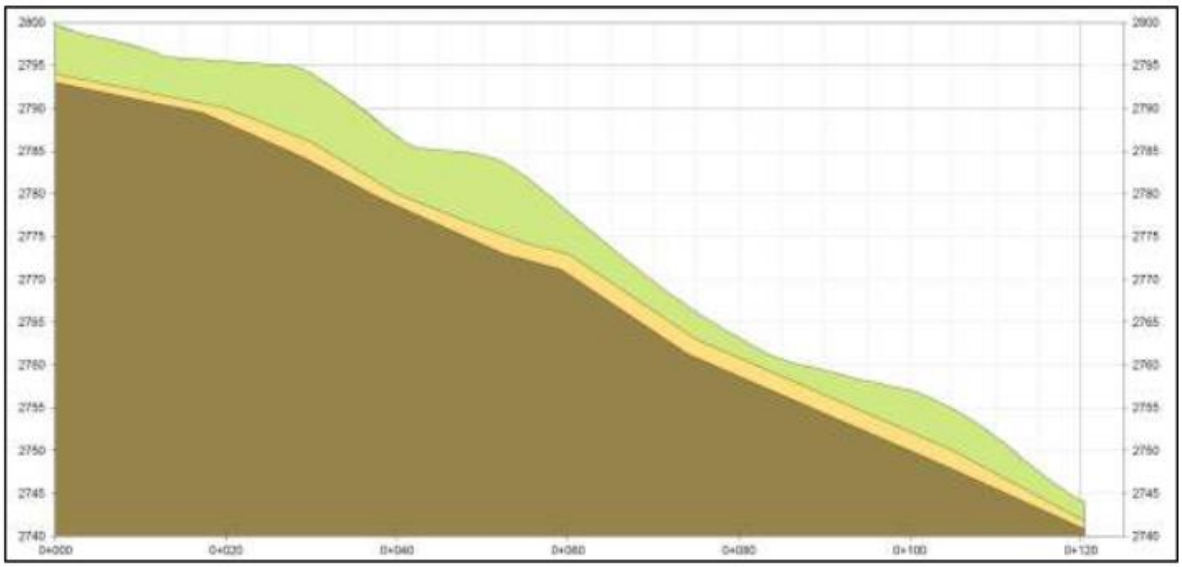
Ilustración 4.7. Perfil Geotécnico 7



Estratos Perfil Geotécnico 7	Peso específico kN/m3	cohesión kPa	fricción °
E5	16.87	13.72	20
E6	16.77	-	31
E7	17.65	-	37

Perfil 8

ESTRATO 3	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: GP	Parámetros tomados de Corte Directo PR-1 a 9.00m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 26°	
Cohesión (c) = 4.90 kPa	
Peso Específico (Y) = 17.95 kN/m³	
ESTRATO 4	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: Roca Clase IV (Mala)	Parámetros tomados de Triaxial TXUU PR-4 a 11.30m
Ángulo de Fricción (Ø °) = 44°	
Cohesión (c) = 194	
Peso Específico (Y) = 18.44 kN/m³	
ESTRATO 5	
Parámetros Geomecánicos	**Observación**
SUCS: ML	Parámetros tomados de Corte Directo C-1
Ángulo de Fricción (Ø °) = 21°	
Cohesión (c) = 9.81	
Peso Específico (Y) = 16.77 kN/m³	



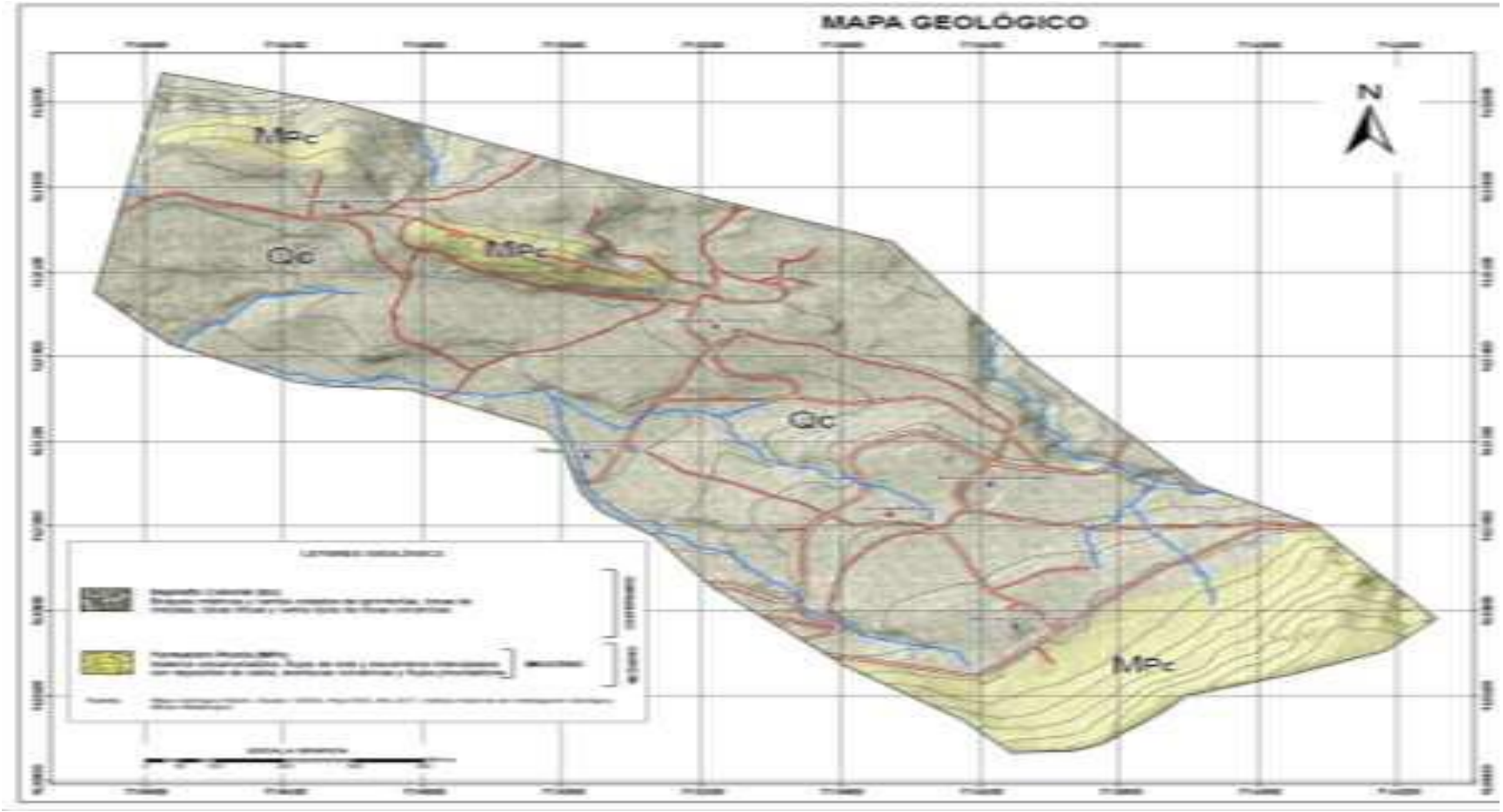
Estratos Perfil Geotécnico 8	Peso específico	cohesión	fricción
	kN/m3	kPa	°
E3	17.95	4.903	26
E4	18.44	194	44
E5	16.77	9.81	21

Resultados de las modelaciones en condiciones actuales

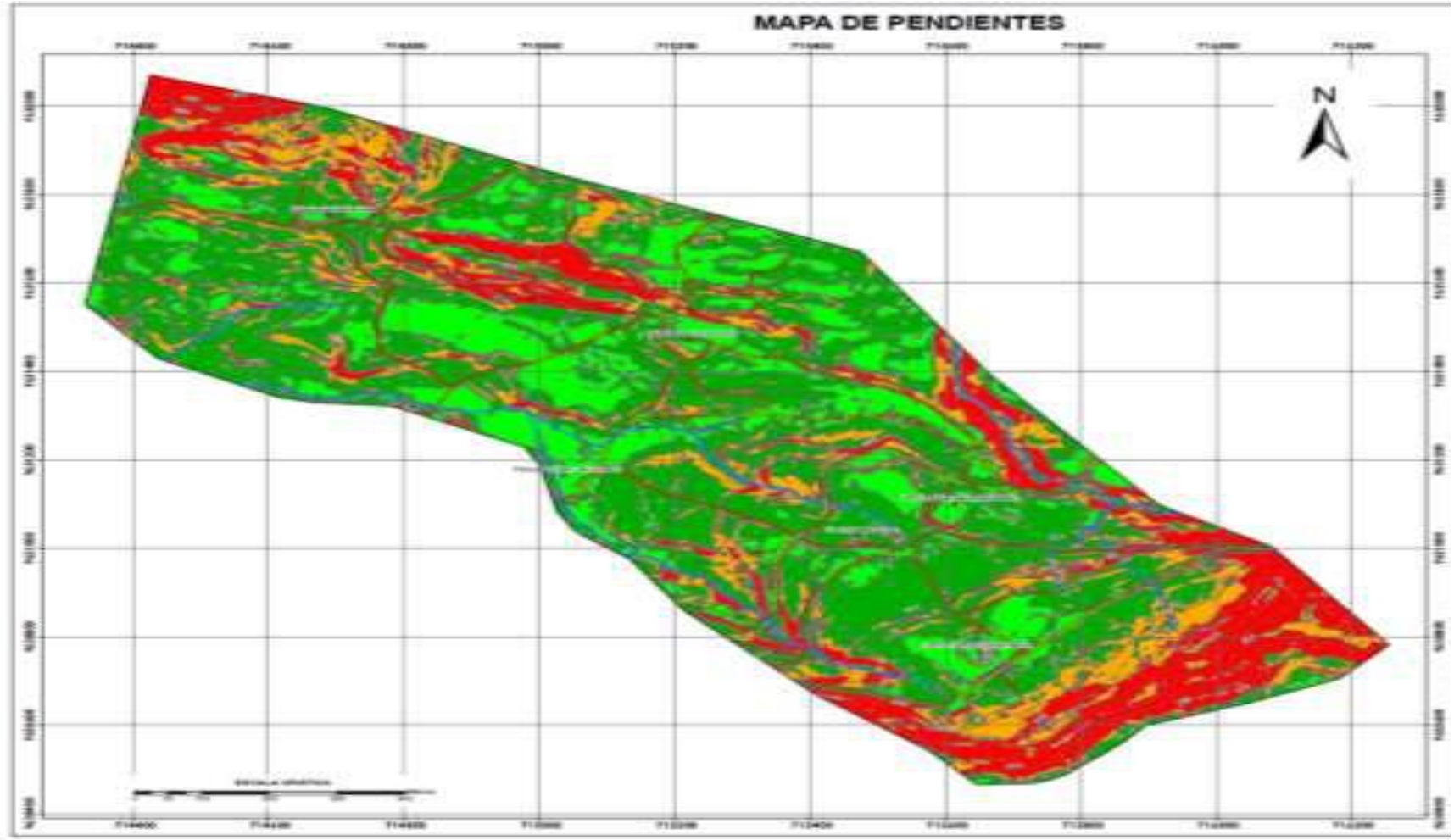
PERFIL 1		
FS ESTÁTICO	**FS PSEUDO-ESTÁTICO**	**FS SATURADO**
0.83	0.71	0.81
PERFIL 2		
FS ESTÁTICO	**FS PSEUDO-ESTÁTICO**	**FS SATURADO**
0.86	0.79	0.81
PERFIL 3		
FS ESTÁTICO	**FS PSEUDO-ESTÁTICO**	**FS SATURADO**
1.40	1.15	1.04
PERFIL 4		
FS ESTÁTICO	**FS PSEUDO-ESTÁTICO**	**FS SATURADO**
1.08	0.95	0.81
PERFIL 5		
FS ESTÁTICO	**FS PSEUDO-ESTÁTICO**	**FS SATURADO**
1.62	1.06	1.07
PERFIL 6		
FS ESTÁTICO	**FS PSEUDO-ESTÁTICO**	**FS SATURADO**
1.72	1.06	1.23
PERFIL 7		
FS ESTÁTICO	**FS PSEUDO-ESTÁTICO**	**FS SATURADO**
1.55	1.01	1.07
PERFIL 8		
FS ESTÁTICO	**FS PSEUDO-ESTÁTICO**	**FS SATURADO**
1.13	0.77	0.56

Anexo 4: Cartografía Temática y Matrices

- A4.1. Mapa Geológico y Geomorfológico de la zona de estudio.

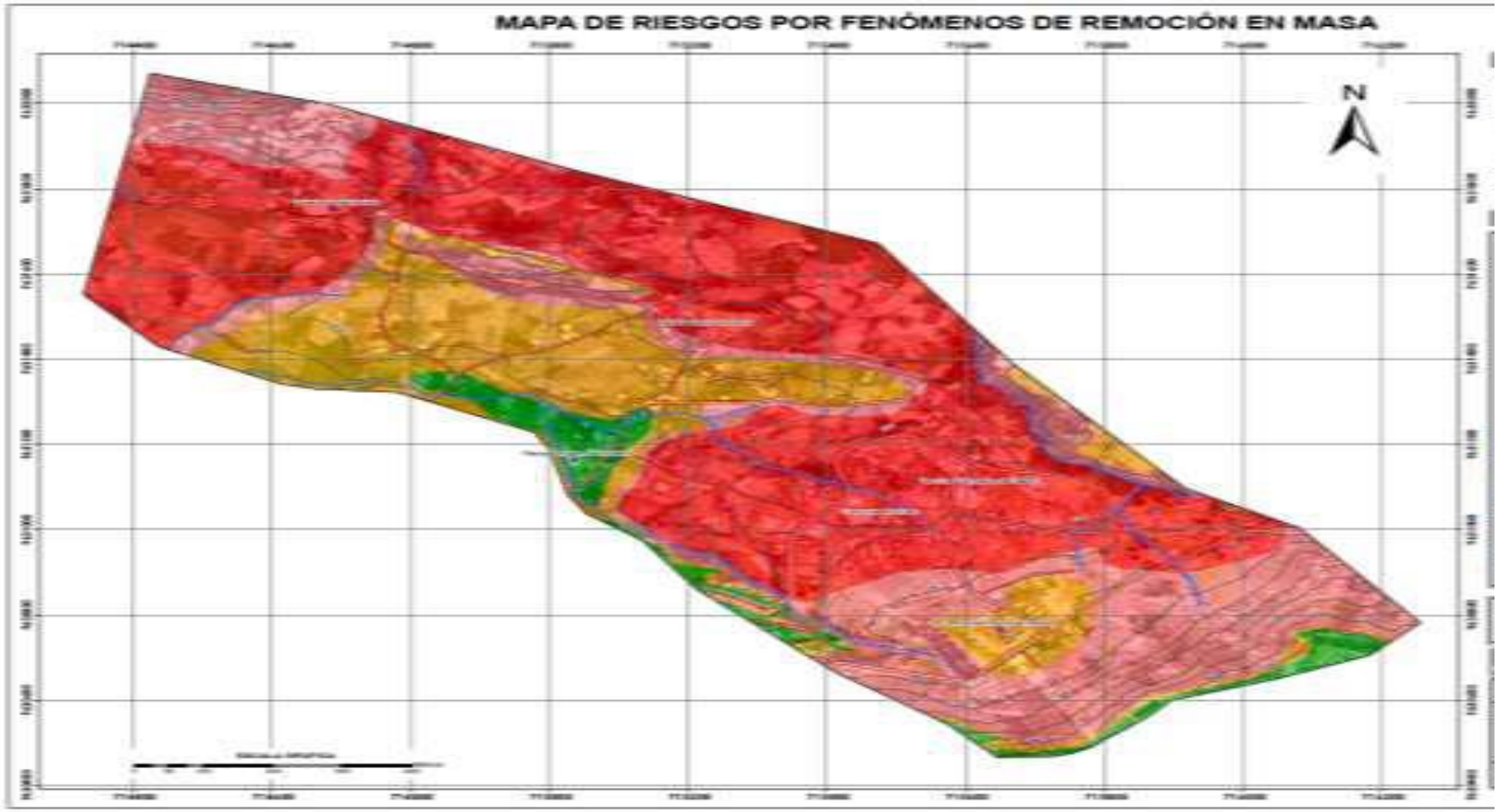


- A4.2. Mapa de Pendientes.



Anexo. 8 Mapa de Pendientes

- A4.3. Mapa de Riesgos y Susceptibilidad por Fenómenos de Remoción en Masa (Escala 1:1000).



Anexo. 9 Mapa de Riesgos y Susceptibilidad por Fenómenos de Remoción en Masa

- A4.4. Matriz Operativa del Semáforo de Alerta Temprana Geotécnica (Formato de impresión para entidades de control).

Nivel de Alerta	Resistividad Eléctrica Promedio (Ω•m)	Profundidad del Nivel Freático	Factor de Seguridad (FS) y Estado Cinemático	Acción Operativa Recomendada
VERDE (Estable)	> 20.00 (Ω * m)	> 15.00 metros (Acuífero profundo)	**FS > 1.20 /** Vectores GPS estables	Tránsito normal. Mantenimiento y desazolve rutinario de subdrenes y cunetas.
AMARILLO (Precaución)	10.00 a 20.00 (Ω * m)	5.00 a 15.00 metros (Acumulación de agua)	**FS 1.00 - 1.20 /** Inicio de deformación "creep"	**Restricción preventiva de tráfico pesado.** Aumento de la capacidad de bombeo en pozos de extracción.
ROJO (Falla Inminente)	< 10.00 (Ω * m)	< 5.00 metros (Saturación superficial extrema)	**FS < 1.00 /** Aceleración de desplazamiento GPS	**Cierre total de la vía.** Evacuación preventiva obligatoria de infraestructura expuesta.

Anexo. 10 Matriz Semáforo de Alerta Geotécnica