



# EVALUACIÓN DE LA ESTABILIDAD DE UN TALUD COMPUESTO POR MAICILLO EN LA RUTA 150, LIRQUÉN, MEDIANTE EQUILIBRIO LÍMITE Y BACK-ANÁLISIS IMPLEMENTANDO UN MATERIAL CON COMPORTAMIENTO ANISÓTROPO

*Javiera Pedreros Carrillo<sup>1</sup> José Miguel Montenegro Cooper<sup>2</sup> Robert Wallace King<sup>3</sup> Roberto Ponce Abarca<sup>4</sup>*

**RESUMEN:** El crecimiento de la población y el aumento de las demandas de desarrollo en la región del Biobío presentan desafíos constantes en ingeniería y en geología, especialmente en la construcción de infraestructura para conectar áreas remotas. Un ejemplo de estos retos es el talud ubicado en el kilómetro 14,4 de la Ruta 150 en Lirquén, el cual deslizó en septiembre de 2023. Este trabajo tiene como objetivo analizar la estabilidad del talud y los factores que contribuyeron a su falla. Para ello, se realizaron salidas a terreno para la recolección de muestras, las cuales fueron posteriormente ensayadas en laboratorio. A partir de los resultados obtenidos y de la información bibliográfica disponible, se elaboró un modelo geotécnico compuesto por un granito con varios grados de meteorización. El estrato más superficial fue considerado "Completamente meteorizado", mientras que a una mayor profundidad se encontró "Saprolito". El análisis de estabilidad actual fue efectuado considerando tres escenarios mediante equilibrio límite. La descripción del material efectuada en terreno sugiere que el talud presenta estructuras heredadas con una dirección de manteo semi paralela a la cara del talud, favoreciendo su deslizamiento. En el análisis de estabilidad efectuado fueron obtenidos factores de seguridad cercanos a la unidad. El back-análisis efectuado en la condición previa a la rotura fue empleado para estimar la posición del nivel freático y los parámetros resistentes de los dos estratos que componen el talud. A partir del back análisis se estimó que al momento del deslizamiento el talud tenía un nivel freático ubicado por encima de los 3,5 metros de profundidad respecto de la superficie, coincidiendo con el cambio de estrato observado en terreno.

**PALABRAS CLAVES:** Talud de maicillo, back análisis, anisotropía

**ABSTRACT:** The growing population and increasing demands for site development in the Biobío region present ongoing challenges in engineering and geology, particularly when constructing infrastructure to connect remote areas. A notable case is the slope located at kilometer 14,4 of Route 150 in Lirquén, which experienced a landslide in September 2023. This study aims to analyze the stability of the slope and the factors that contributed to its failure. Field surveys were conducted to collect soil samples, which were subsequently tested in the laboratory. Based on the obtained results and existing literature, a geotechnical model was developed. This model revealed that the slope consists of granite with varying degrees of weathering. The uppermost layer was classified as "Completely Weathered," while "Saprolite" was identified at greater depths. The current stability analysis was conducted under three scenarios using the limit equilibrium method. Field observations indicate that the slope exhibits inherited structures with a dip direction that is approximately parallel to the slope face, which promotes sliding. The stability analysis yielded safety factors close to unity. A back-analysis was conducted under pre-failure conditions to estimate the position of the water table and the strength parameters of the two strata that compose the slope. The back-analysis indicated that at the time of the landslide, the water table was located more than 3,5 meters below the surface, coinciding with the stratigraphic change observed in the field.

**KEYWORDS:** Maicillo slope, back analysis, anisotropy

---

<sup>1</sup> Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil Geológica, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [jpdreros@ing.ucsc.cl](mailto:jpdreros@ing.ucsc.cl)

<sup>2</sup> Profesor Guía, D. de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [jmontenegro@ucsc.cl](mailto:jmontenegro@ucsc.cl)

<sup>3</sup> Profesor Informante, D. Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [rking@ucsc.cl](mailto:rking@ucsc.cl)

<sup>4</sup> Profesor Informante, D. Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, [rponce@ucsc.cl](mailto:rponce@ucsc.cl)



## 1. INTRODUCCIÓN

El crecimiento poblacional y las crecientes necesidades de desarrollo en la región del Biobío representan constantes desafíos ingenieriles y geológicos para la construcción de infraestructura destinada a conectar zonas aisladas. Estas obras suelen requerir la modificación de las laderas, lo que puede generar taludes inestables y, en algunos casos, deslizamientos que afectan caminos, construcciones y, en algunos casos, ponen en riesgo vidas humanas. Las condiciones geológicas y climáticas de la región dificultan aún más los análisis de estabilidad de taludes.

El maicillo es un suelo residual derivado de la meteorización del Batolito Costero, que conserva las discontinuidades de la roca madre (denominadas estructuras heredadas). Estas estructuras actúan como planos de debilidad, favoreciendo procesos de remoción en masa. Además, las variaciones en el nivel freático, influenciadas por el clima, desempeñan un papel clave en la estabilidad de los taludes, incrementando el riesgo de deslizamientos durante periodos de lluvias intensas.

En 2023 el talud ubicado en la cara noroeste del kilómetro 14,4 de la ruta 150, Lirquén, comuna de Penco alcanzó la rotura. En ese evento se movilizaron unos 140 metros cúbicos de suelo granítico meteorizado, donde se identificaron estructuras heredadas. A partir de la información recopilada en múltiples visitas a terreno, se plantea la hipótesis de que la rotura del talud se produjo debido a la orientación y las propiedades geotécnicas de una familia de estructuras heredadas.

Por tanto, el objetivo de este trabajo es evaluar la estabilidad del talud de Lirquén, considerando un modelo de comportamiento anisótropo del material en el que se produjo la rotura. El factor de seguridad de la situación actual fue estimado mediante un *software* de equilibrio límite. Además, se efectuó un back análisis de varios escenarios de cálculo considerando los perfiles transversales previos al deslizamiento para estimar los parámetros resistentes del material considerando su anisotropía.

## 2. MARCO TEÓRICO

El marco teórico incluye conceptos fundamentales sobre suelo y roca, las características y procesos asociados a las remociones en masa, las metodologías empleadas para evaluar la estabilidad de taludes y una descripción detallada de la zona de estudio, destacando sus aspectos geológicos y geomorfológicos.

### 2.1. Suelo y roca

La roca es un agregado natural de minerales unidos por fuerzas de cohesión fuertes y permanentes (Terzaghi, 1996). Estas propiedades le otorgan una alta resistencia y rigidez que le permiten soportar elevadas cargas con reducida deformación. La roca expuesta a agentes externos como el clima, el agua y la actividad biológica, experimenta la erosión y/o meteorización (Goodman, 1989).

La meteorización es la rotura física (desintegración) y la alteración química (descomposición) de una roca en la superficie terrestre o cerca de ella (Tarbuck et al., 2020). La meteorización física le confiere superficies frescas para que se produzca la meteorización química, mientras que esta última los debilita la roca para que sea más susceptible a la meteorización física (Earle, 2019). Este proceso gradual de meteorización da origen al suelo, un material no consolidado compuesto por partículas minerales, materia orgánica, agua y aire. El grado de meteorización de una roca fue propuesto por la ISRM (1981) mediante observación directa en el afloramiento y/o testigo según la Tabla 1.

**Tabla 1:** Evaluación del grado de meteorización de un macizo rocoso (ISRM, 1981)

Grado de meteorización	Tipo	Descripción
I	Fresco	No aparecen signos de meteorización.
II	Ligeramente meteorizado	La decoloración indica alteración del material rocoso y de las superficies de discontinuidad. Todo el conjunto rocoso está decolorado por meteorización.
III	Moderadamente meteorizado	Menos de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
IV	Altamente meteorizado	Más de la mitad del macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. La roca fresca o decolorada aparece como una estructura continua o como núcleos aislados.
V	Completamente meteorizado	Todo el macizo rocoso aparece descompuesto y/o transformado en suelo. Se conserva la estructura original del macizo rocoso.
VI	Suelo residual	Todo el macizo rocoso se ha transformado en suelo. Se ha destruido la estructura del macizo y la fábrica del material.

### 2.1.1. Suelo residual

Un suelo residual se define como el material resultante de la meteorización de una roca que no es transportado, sino que permanece en su lugar (Wesley, 2010). El saprolito (Figura 1) es una roca meteorizada el cual es intermedio entre la roca sana y el suelo meteorizado. Las propiedades resistentes del saprolito dependen de las estructuras heredadas presentes en la roca parental (Deere & Patton, 1971). Las paredes de las estructuras heredadas se debilitan (Aydin, 2006) y suele depositarse materiales de relleno de baja resistencia al corte. Debido a su alta capacidad de infiltración, los suelos residuales, incluido el saprolito, son propensos a deslizamientos, especialmente durante períodos de lluvia intensa (Suárez, 2009).

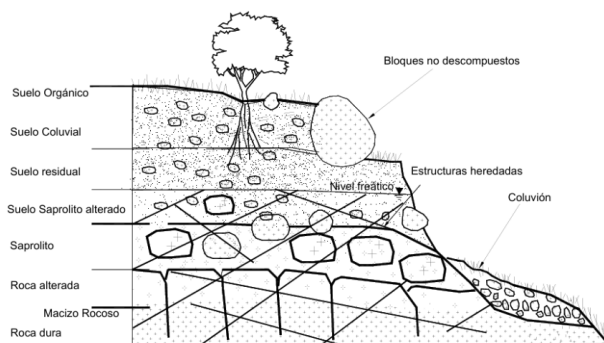


Figura 1: Perfil de meteorización de un granito (Suárez, 2009).

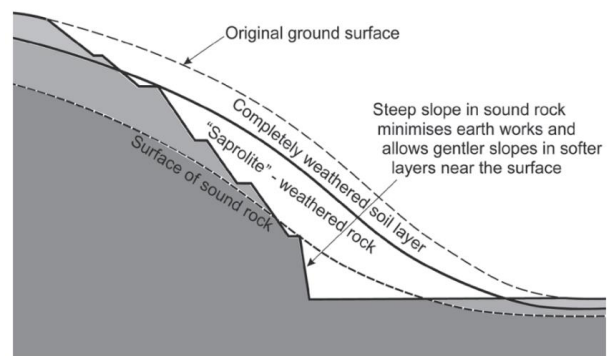


Figura 2: Perfil de un talud cortado en roca ígnea meteorizada como el granito (Wesley, 2010).

La Figura 2 muestra un esquema geotécnico de un talud con estratos que presentan diferentes grados de meteorización, identificando tres estratos principales: una capa superior de suelo completamente meteorizado, una intermedia de saprolito o roca meteorizada y, en la base, roca sana. Según Wesley (2010), cuando un talud compuesto por suelo residual es retaluzado, este presenta tres estados del material. En la coronación se observa una capa que corresponde a la superficie original previo al deslizamiento o corte, una capa de roca sana en el pie del talud y una capa de saprolito comprendida entre estas dos. Debido a estas diferencias de material, es fundamental considerarlo para definir la pendiente del talud, adaptándolas al tipo de material presente. En la zona superior, donde se encuentra una capa de suelo completamente meteorizado, se recomienda el uso de pendientes suaves debido a la baja resistencia del material. Más abajo, en la zona de saprolito y roca meteorizada, es posible emplear taludes ligeramente más inclinados, aunque se debe mantener precaución debido a la presencia de materiales alterados. Finalmente, en la base, donde la roca sana es predominante, se pueden construir taludes más empinados, lo que reduce la necesidad de excavaciones y movimientos de tierra.

Las estructuras heredadas del macizo rocoso original suelen transmitirse a los suelos residuales como discontinuidades o vías preferenciales para el movimiento del agua. En general, un suelo residual conserva las estructuras heredadas de su roca madre, tales como las juntas o las diaclasas (Wesley & Irfan, 2012). La influencia de las estructuras heredadas no se detecta fácilmente en terreno hasta que los taludes experimentan inestabilidad (McKenzie, 2016). La estabilidad de un talud con estructuras heredadas está gobernada por la resistencia interna de la roca blanda o suelo residual, así como por la resistencia a lo largo de sus discontinuidades (Suárez, 2009). Por lo tanto, es necesario caracterizar geotécnicamente tanto la matriz de suelo como sus estructuras heredadas.

### 2.1.2. Comportamiento drenado/no drenado del suelo y sus criterios de rotura

Los modelos de comportamiento son aproximaciones matemáticas empleadas para predecir el comportamiento de materiales y estructuras bajo diferentes condiciones. Las condiciones más desfavorables en mecánica de suelos usualmente se producen en los saturados. Los comportamientos drenado y no drenado de un suelo saturado en geotecnia representan la respuesta del terreno frente a variaciones de su estado tensional. La tensión efectiva ( $\sigma'$ ) corresponde a la tensión intergranular entre las partículas de suelo. La ley de Terzaghi define que la tensión efectiva se determina restando la tensión aplicada ( $\sigma$ ) con la presión de poro ( $u$ ). Lo anterior es importante dado que la resistencia al corte de un suelo en condiciones drenadas se evalúa en tensiones efectivas, mientras que para el caso no drenado se realiza en tensiones totales.

El comportamiento drenado ocurre cuando el agua de los poros internos del suelo tiene tiempo suficiente para escapar durante la aplicación de carga, disipándose completamente el exceso de presión de poros. Este comportamiento ocurre principalmente en suelos de elevada permeabilidad (arenas y/o gravas) o bajo condiciones de la aplicación de una carga lenta (Terzaghi et al., 1996). El criterio de rotura empleado para evaluar la resistencia al corte del suelo en función de la variación del esfuerzo normal se expresa linealmente mediante el criterio de rotura de Mohr-Coulomb (Coulomb, 1776) (ver Ecuación 1). La resistencia corte ( $\tau$ ) del suelo se obtiene sumando la cohesión ( $c$ ) con la multiplicación entre la tangente del ángulo de fricción efectivo ( $\phi$ ), y la tensión normal efectiva al plano.

$$\tau = c + \sigma' \tan \phi \quad (1)$$

Por otro lado, el comportamiento no drenado ocurre cuando el agua en los poros del suelo no alcanza a disiparse parcial o completamente al efectuar una variación del estado tensional debido a la baja permeabilidad del suelo (arcillas) o bajo condiciones de carga rápida. La resistencia al esfuerzo cortante es igual a la resistencia al corte sin drenaje ( $S_u$ ) (ver Ecuación 2).

$$\tau = S_u \quad (2)$$

## 2.2. Remoción en masa

La remoción en masa es un movimiento de una masa de roca, detritus y/o suelo pendiente abajo (Cruden & Varnes, 1996). Este fenómeno se genera por diversos factores, pero principalmente por procesos gravitacionales en un determinado conjunto de terreno. La nomenclatura más utilizada en las ciencias geotécnicas se basa en los sistemas de clasificación propuestos por Hutchinson, 1968 y Varnes, 1958 y 1978. Este último sistema fue actualizado por Cruden y Varnes en el "Special Report 247" del Transportation Research Board de los Estados Unidos (1996).

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana, ya que presenta una pendiente o cambios significativos de altura. Por un lado, ladera en la literatura técnica se define cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural, y, por otro lado, esta recibe la denominación de talud cuando este se conformó artificialmente (Suárez, 2009). El termino remoción en masa o “landslide” se refiere al “movimiento de una masa de roca, detritos o tierra bajo una pendiente” (Cruden D. , 1991).

### 2.2.1. Modelo conceptual

En el modelo conceptual se describen, analizan y valoran las causas y mecanismos que producen la remoción en masa. Además, plasma de forma escrita y gráfica cómo se comporta el talud de acuerdo con sus características físicas, químicas y ambientales, así como actúan los mecanismos que producirían o están produciendo un determinado comportamiento (Suárez, 2009).

Los factores que controlan los movimientos de las laderas son aquellos capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno (Tabla 2). Los factores condicionantes (o «pasivos») dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los desencadenantes (o «activos») pueden ser considerados como factores externos que provocan o desencadenan las inestabilidades y son responsables, por lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos (González de Vallejo, 2002).

**Tabla 2:** Influencia de los diferentes factores en las condiciones de los materiales y de las laderas. Modificado de González de Vallejo (2002)

Factores		Influencias y efectos
Condicionantes	Relieve (pendientes, geometría)	Distribución del peso del terreno.
	Litología (composición, textura)	Densidad, resistencia, comportamiento hidrogeológico.
	Estructura geológica y estado tensional	Resistencia, deformabilidad, comportamiento discontinuo y anisótropo. Zonas de debilidad.
	Propiedades geomecánicas de los materiales	Comportamiento hidrogeológico, generación de presiones intersticiales.
	Deforestación	Modificaciones en el balance hídrico. Erosión.
	Meteorización	Cambios físicos y químicos, erosión externa e interna, generación de zonas de debilidad.
Desencadenantes	Precipitaciones y aportes de agua	Variación de las presiones intersticiales y del peso del terreno. Saturación en suelos. Erosión.
	Cambio en las condiciones hidrológicas	
	Aplicación de cargas estáticas o dinámicas	Cambio en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera. Incremento de presiones intersticiales.
	Cambios morfológicos y de geometría en las laderas	Variación de las fuerzas debidas al peso. Cambio en el estado tensional.
	Erosión o socavación del pie	Cambios geométricos en la ladera. Cambios en la distribución del peso de los materiales y en el estado tensional de la ladera.
	Acciones climáticas (procesos de deshielo, heladas, sequías)	Cambio en el contenido de agua del terreno. Generación de grietas y planos de debilidad. Disminución de las propiedades resistentes

En la mayoría de los casos son varias las causas que contribuyen al movimiento de una ladera; aunque con frecuencia se atribuyen a la acción de algún factor desencadenante (lluvias, terremoto, etc.), las inestabilidades no se hubieran producido de no existir una serie de condiciones predeterminadas que favorecen el fenómeno (González de Vallejo, 2002).

Un factor desencadenante crucial en la estabilidad de un talud o ladera es el nivel freático, que corresponde al nivel en el cual la presión en el agua de poros es igual a la presión atmosférica. Los niveles freáticos pueden tener gran espesor o estar colgados dentro de un manto permeable sobre un impermeable. Al ocurrir lluvias acumuladas importantes, los niveles freáticos ascienden generándose una presión de poros relativamente permanente. Al ascender el nivel freático, se puede presentar afloramiento de agua y erosión en los taludes. Debido a que el agua no resiste esfuerzos cortantes, se produce una disminución en la tensión efectiva, por lo que disminuye la resistencia al corte de toda la masa de suelo. Además, en el caso de un suelo con estructuras heredadas el escenario es más desfavorable ya que a través de estas discontinuidades se facilita el flujo de agua, llegando a producirse meteorización al interior del talud (Suárez, 2009).

### 2.2.2. Tipos de remociones en masa

En la literatura científica se encuentran variadas clasificaciones de movimientos en masa propuestas por Varnes (1958 y 1978), quien emplea como criterio principal el tipo de movimiento y el tipo de material. El autor divide los movimientos en cinco tipos: caídas, vuelcos, deslizamientos, propagaciones y flujos, mientras que los materiales solo en dos clases: rocas y suelos. A pesar de existir clasificaciones de remociones en masa, en la mayoría de los casos es difícil encasillar el proceso bajo un solo tipo, debido a que puede presentar diferentes comportamientos a lo largo de su trayectoria. Es por esto por lo que nacen movimientos de tipo complejo, que involucran dos o más de los procesos anteriores.

#### 2.2.2.1. Deslizamientos

El deslizamiento en masa consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada. Los deslizamientos en masa pueden ser de una sola masa coherente que se mueve, o pueden comprender varias unidades o masas semindependientes. El movimiento puede ser progresivo, es decir, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda la que sería la superficie de falla, sino que se va generando en un proceso gradual. La superficie de falla es una zona de determinado espesor, en la cual se producen cambios volumétricos y desplazamientos relacionados con la falla o rotura, al cortante de los materiales. Los desplazamientos en masa se pueden subdividir en subtipos denominados deslizamientos rotacionales, deslizamientos traslacionales o planares y deslizamientos compuestos de rotación y traslación. Esta diferenciación es importante porque puede definir el sistema de análisis y el tipo de estabilización que se va a emplear (Suárez, 2009).

- *Deslizamiento rotacional:* Se trata de un deslizamiento en el que la superficie de ruptura está curvada cóncavamente hacia arriba y el movimiento del deslizamiento es aproximadamente rotacional alrededor de un eje paralelo a la superficie del suelo y transversal a través del deslizamiento (Cruden & Varnes, 1996).
- *Deslizamiento traslacional:* En este tipo de deslizamiento, la masa del deslizamiento se mueve a lo largo de una superficie aproximadamente plana con poca rotación o inclinación hacia (Cruden & Varnes, 1996).
- *Deslizamientos Compuestos de Traslación y Rotación:* Con frecuencia se presentan movimientos que incluyen dentro del patrón de desplazamiento general, movimientos de traslación y de rotación. A estos movimientos se les conoce como “compuestos”. Igualmente se pueden presentar hundimientos o extensiones laterales en forma conjunta. La mayoría de los movimientos incluyen varios tipos de desplazamiento, aunque sólo predomina uno (Suárez, 2009).

## 2.3. Evaluación de la estabilidad de taludes

En el análisis de estabilidad de taludes, se abordan distintos enfoques para evaluar su seguridad y comportamiento frente a condiciones críticas. Entre estos destacan los estados límite, que definen los criterios bajo los cuales el talud alcanza condiciones de falla, los métodos de evaluación que permiten cuantificar factores de seguridad y modelar el comportamiento del terreno. Finalmente, el back análisis se emplea para interpretar fallas previas, ajustando parámetros según observaciones reales, con el fin de mejorar la precisión de los modelos predictivos.

### 2.3.1. Estados límites

Los estados límite son utilizados para asegurar la seguridad y funcionalidad de las estructuras durante su vida útil. Estos se dividen principalmente en dos categorías: estado límite último (ELU) y estado límite de servicio

(ELS), cada uno relacionado con diferentes aspectos del comportamiento estructural (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996).

El estado límite último (ELU) se refiere a la condición en la que una estructura o sistema alcanza su capacidad máxima de carga antes de sufrir una falla o colapso. Este estado es crítico, ya que está directamente relacionado con la seguridad estructural. El análisis del ELU se enfoca en garantizar que las cargas extremas o las condiciones desfavorables no provoquen el colapso de la estructura. El ELU puede implicar el deslizamiento de un talud o la ruptura de una cimentación (Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996). El factor de seguridad es uno de los métodos utilizados para asegurar que una estructura no alcance este estado, y se basa en un análisis de equilibrio límite, en el que se evalúan las condiciones críticas bajo las cuales la estructura pierde su estabilidad (Bowles, 1996).

El estado límite de servicio (ELS) está relacionado con el comportamiento funcional de una estructura durante su uso. En este estado, aunque no se produce una falla catastrófica, las deformaciones o desplazamientos pueden ser excesivos y afectar la funcionalidad de la estructura. El ELS se enfoca en asegurar que los desplazamientos y las deformaciones no superen los límites aceptables establecidos para mantener la comodidad y seguridad de los usuarios, aunque no lleguen a comprometer la integridad estructural (Chowdhury & Chowdhury, 2008).

### 2.3.2. Métodos de evaluación

La evaluación de la estabilidad de taludes se basa en métodos analíticos y numéricos que permiten estimar factores de seguridad y predecir posibles fallas. Entre ellos, se encuentran el equilibrio límite, los elementos finitos y el análisis límite.

#### 2.3.2.1. Métodos de equilibrio límite (LEM)

El método de equilibrio límite (LEM, por sus siglas en inglés) es una técnica clásica utilizada para evaluar la estabilidad de taludes mediante el análisis del equilibrio estático de un sistema potencialmente inestable. Este método calcula el factor de seguridad (FS), definido como la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas que provocan el deslizamiento. Matemáticamente, el FS se expresa como se plantea en la Ecuación 3

$$FS = \frac{\text{Sumatoria de fuerzas resistentes}}{\text{Sumatoria de fuerzas actuantes}} \quad (3)$$

Si el FS es mayor a 1, el talud se considera estable, mientras que un valor menor a 1 indica que es inestable. El método supone que la falla ocurre a lo largo de una superficie predefinida, que puede ser circular, plana o arbitraria, y que las propiedades resistentes del suelo están dadas por su cohesión y su ángulo de fricción interna

Existen varios enfoques dentro del LEM, como el método de Fellenius, que asume superficies de falla circulares y analiza el equilibrio considerando momentos, o el método de Bishop modificado, que mejora la precisión al incluir tanto el equilibrio de fuerzas como el de momentos. Por otro lado, el método de Morgenstern-Price permite analizar superficies arbitrarias y es más completo, aunque más complejo. También destaca el método de Janbu, que es útil para suelos heterogéneos al permitir superficies no circulares mediante un enfoque iterativo (Budhu, 2011; Duncan & Wright, 2005; Terzaghi, Peck, & Mesri, 1996).

#### 2.3.2.2. Métodos de elementos finitos (FEM)

El método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) es una técnica numérica utilizada en ingeniería para resolver problemas complejos de física y mecánica, como el análisis de estabilidad de taludes y estructuras. El FEM implica discretizar un dominio complejo en pequeños "elementos" con geometrías simples, asignarles propiedades materiales, formular las ecuaciones que describen el comportamiento de cada elemento, y resolverlas simultáneamente para obtener una aproximación de la solución global del problema. Este método es especialmente útil para abordar problemas con geometrías complicadas y condiciones de frontera no triviales, como aquellos presentes en geotecnia. Sin embargo, su principal desventaja es el alto costo computacional en problemas grandes y la dependencia de la calidad de la malla utilizada (Zienkiewicz & Taylor, 2000).

#### 2.3.2.3. Métodos de análisis límite

El análisis límite permite evaluar rápidamente la estabilidad o la capacidad portante de las geoestructuras sin tener que realizar un exhaustivo análisis elastoplástico paso a paso. Son aplicables tanto las cargas Fijas como las Multiplicadoras. En el Análisis Límite, las primeras se mantienen constantes mientras que las segundas se

amplifican hasta alcanzar un estado de colapso incipiente. El factor por el que deben amplificarse las cargas multiplicadoras para provocar el colapso también se denomina multiplicador de colapso. Además de determinar el multiplicador de colapso para un conjunto de cargas externas, también es posible calcular el factor por el que debe amplificarse la gravedad para alcanzar un estado de colapso (OPTUM Computational Engineering, 2016).

### 2.3.3. Back análisis

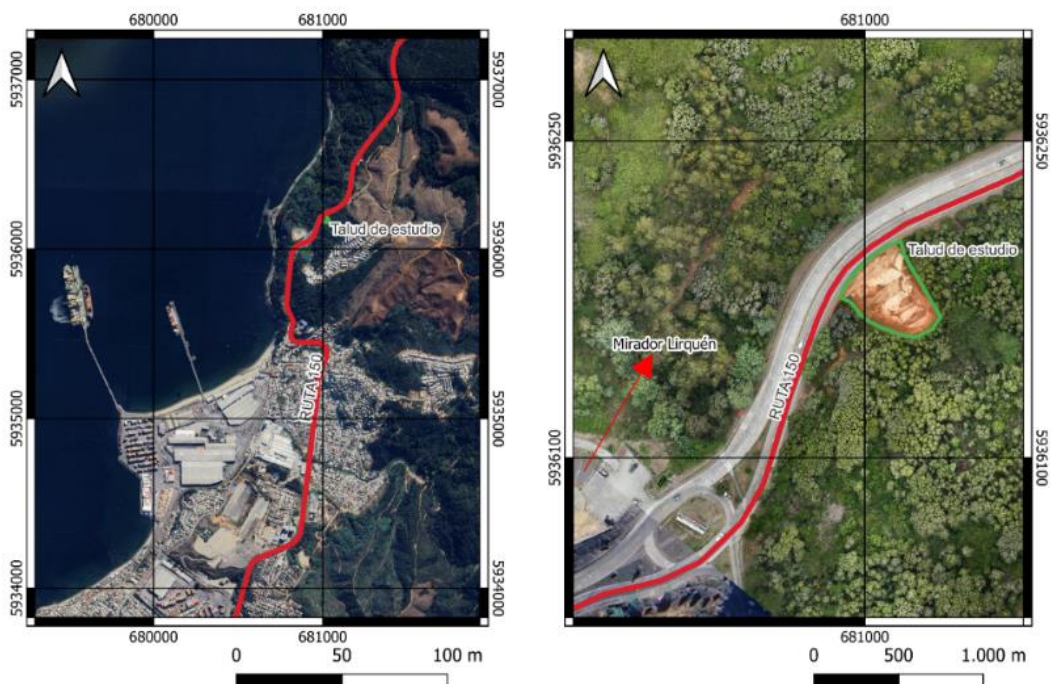
Cuando un talud falla por deslizamiento, puede proporcionar una fuente de información útil sobre las condiciones del talud en el momento del fallo, así como una oportunidad para validar los métodos de análisis de estabilidad. Dado que el talud ha fallado, se considera que el factor de seguridad es la unidad (1,0) en el momento del fallo. Utilizando este conocimiento y un método de análisis apropiado, es posible desarrollar un modelo del talud en el momento en que falló. El modelo consiste en los pesos unitarios y las propiedades de resistencia al corte del suelo, las aguas subterráneas y las condiciones de presión de poros y el método de análisis, incluidos los mecanismos de fallo. Un modelo de este tipo ayuda a comprender mejor el fallo y servir de base para el análisis de las medidas remediadoras (Duncan, 2014).

## 2.4. Antecedentes de la zona de estudio

Los principales antecedentes recopilados de la zona de estudio son la geología, geomorfología y los eventos previos de remoción en masa registrados en el área.

### 2.4.1. Ubicación

El talud estudiado se ubica en el punto kilómetro 14,4 de la Ruta 150, comuna de Penco (Figura 3 (a)). Las coordenadas UTM del área de estudio son 681010,46 E y 5936181,41 (Huso 18-WGS 84). El ángulo de inclinación y la altura del talud en agosto de 2024 fue de aproximadamente 30° y 23 m, respectivamente, orientado en dirección NE-SW e inclinado hacia el NW (ver Figura 3 (b)).



(a)

(b)

Figura 3: Mapas de ubicación del talud de estudio (a) Mapa general comuna de Penco resaltando ruta 150 (b) Mapa específico sector del talud. Generado con QGIS 3.34.8. y Ortofoto Lirquén (MOP, 2024).

En el área de estudio han ocurrido al menos dos eventos de remoción en masa, por lo que éste ha tenido que ser reperfilado y retaluzado (Figura 4). A la fecha, diciembre de 2024, el talud presenta cuatro terrazas de aproximadamente cinco metros de altura cada una, a excepción de la primera o pie de talud. Las precipitaciones han producido erosión superficial y grietas en el material, así como la vegetación ha comenzado a crecer y cubrir parcialmente algunas zonas del talud.



Figura 4: Talud en el área de estudio (diciembre, 2024), con cuatro terrazas. Se observan erosión, grietas y algunas zonas cubiertas por vegetación.

#### 2.4.2. Geología y Geomorfología

La geología de la zona de estudio, según el *Mapa Geológico del Sector Menque-Concepción* (Geología de Campo II, 2008), a escala 1:50.000 (Figura 5), está conformada por diversas unidades geológicas distintivas. Entre ellas se encuentra la Formación Cosmito (Paleoceno-Eoceno Inferior, Tct), caracterizada por niveles de areniscas de grano medio, lutitas, arcillolitas y mantos de carbón, con colores que varían entre verdosos, pardos y grises.

Otra unidad importante es la Formación Quiriquina (Maastrichtiano, Krq), compuesta por areniscas fosilíferas que van desde litarenitas hasta arcosas, con niveles de concreciones fosilíferas de tamaños diversos y un conglomerado basal con líticos del basamento y fragmentos de bivalvos. También se encuentran los Depósitos Litorales (Qtl), conformados por arenas y gravas de playas actuales.

El Complejo Metamórfico Tomé - Zona de Andalusita (Pza) se caracteriza por filitas moteadas y hornfels con andalusita, cordierita, biotita y mica blanca, además de pizarras y micaesquistos subordinados. Por último, la Unidad Concepción - Subunidad Pingüeral (Pzp) incluye tonalitas de biotita y hornblenda, así como dioritas de grano medio.

Es relevante señalar que, durante la georreferenciación del mapa geológico de la zona, se identificó una discrepancia entre la cartografía geológica y la topografía del área. Aunque el mapa ubica el talud en la Formación Quiriquina, observaciones de terreno y ensayos realizados sugieren que esta asignación no corresponde a la realidad geológica del sitio. Se presume que el talud está localizado dentro de la Unidad Concepción.

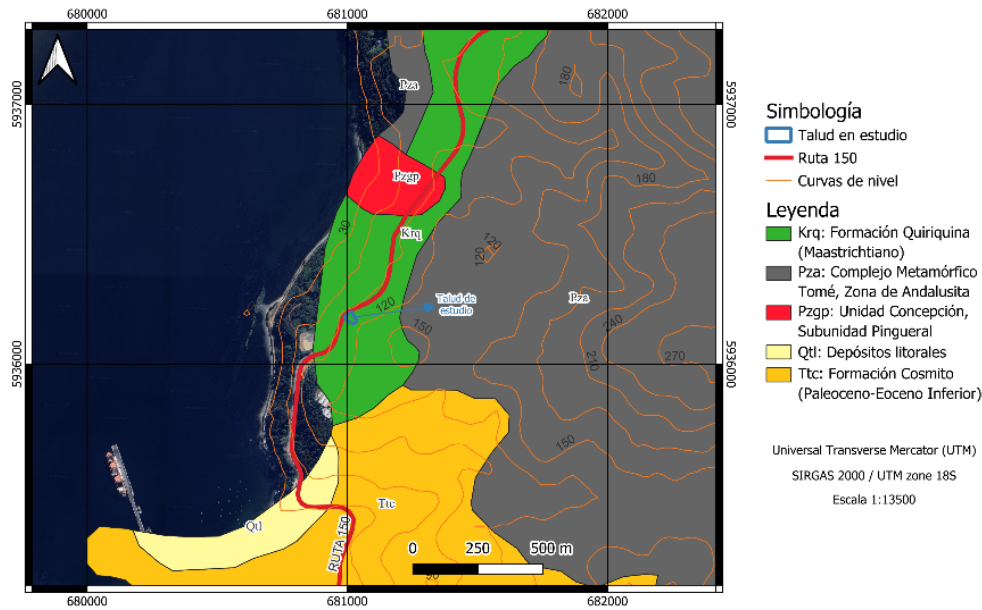


Figura 5: Mapa geológico de la zona de estudio. Modificado de (Geología de Campo II, 2008). Generado con QGIS 3.34.8.

El contexto geomorfológico indica que el talud forma parte de una pendiente más amplia que desciende hacia el valle costero (Figura 6), caracterizado por una morfología dominada por colinas onduladas y sectores con pendientes moderadas a pronunciadas, resultado de procesos tectónicos y erosivos asociados a la evolución geológica de la Región del Biobío (SERNAGEOMIN, 2003). Estas pendientes están constituidas por materiales residuales y coluviales que se acumulan en los sectores más bajos, producto de la meteorización de las rocas subyacentes y el arrastre de sedimentos por escorrentías superficiales y eventos de lluvia intensa (Díaz & Sepúlveda, 2012).

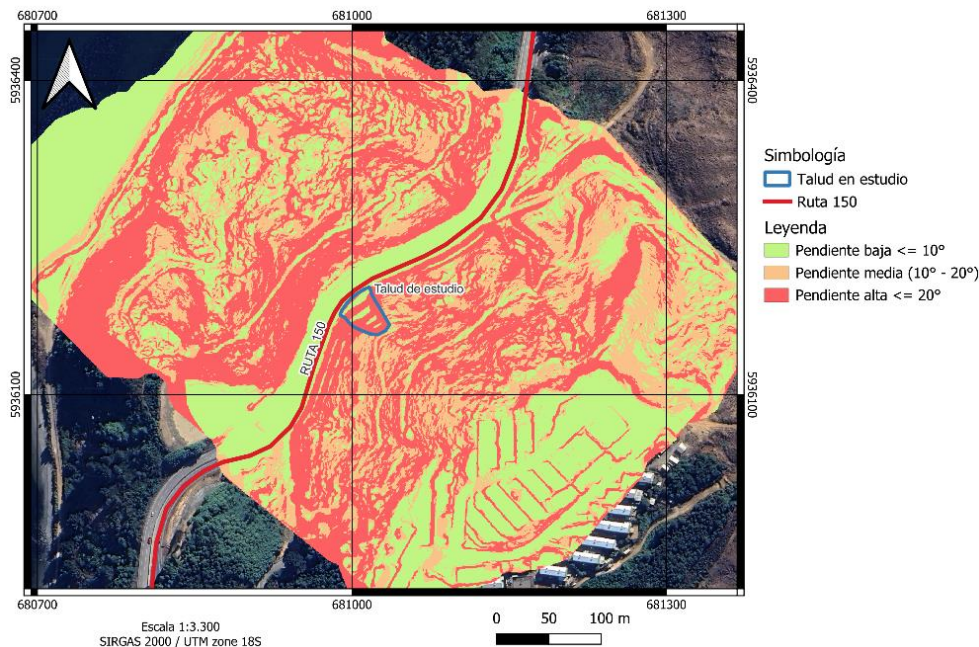


Figura 6: Mapa de pendientes zona de estudio categorizadas según grado de pendiente en base a clasificación propuesta por González de Vallejo (2002). Generado con QGIS 3.34.8 en base a Ortofoto Lirquén (MOP, 2024).

La interacción entre las características geomorfológicas y los procesos dinámicos del área, como la acción del agua superficial, la actividad sísmica típica de la zona y los cambios en el uso del suelo, genera inestabilidades localizadas, particularmente en sectores intervenidos por la construcción de infraestructura, como la Ruta 150

(Villalobos, Araya, & López, 2016). La pendiente más amplia, al formar parte de una cuenca hidrográfica que drena hacia el valle costero, está influenciada por procesos de saturación de suelos durante temporadas de lluvias, como es el caso de 2023 (Figura 7), año del segundo deslizamiento registrado, en donde los meses de agosto y octubre se registraron precipitaciones superiores a las normales aumentando el riesgo de deslizamientos (Dirección General de Aeronáutica Civil, 2024). Las variaciones en la cobertura vegetal y la exposición prolongada de los materiales del talud debido a cortes realizados para la construcción de la vía también aumentan los procesos erosivos y debilitan la estructura general de la pendiente (Duncan & Wright, 2005)

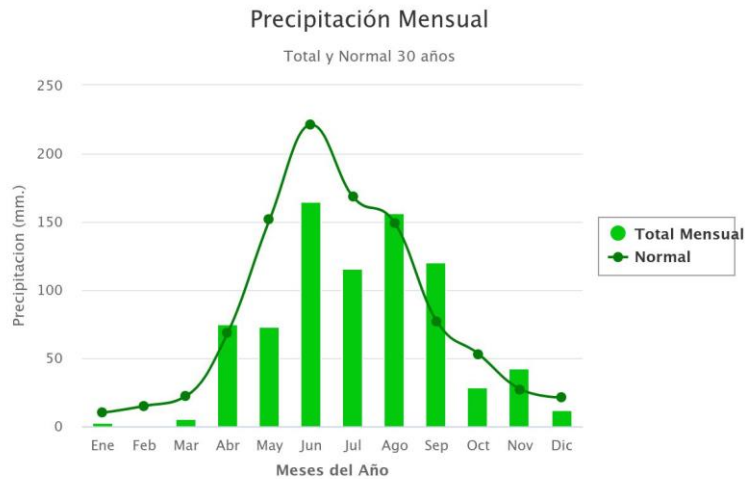


Figura 7: Precipitación total mensual en 2023 registrada en Estación Carriel Sur, Concepción. (Dirección General de Aeronáutica Civil, 2024)

### 2.4.3. Antecedentes de movimientos y falla en la zona de estudio

El historial de los movimientos ocurridos en el talud fue analizado mediante la revisión de fotografías históricas de Google Earth Pro y Street View. En la imagen satelital de junio de 2011, correspondiente a la zona de estudio, no se observan indicios de movimientos (ver Figura 8 (a)). Sin embargo, en la fotografía de agosto de 2012 se identifica el primer evento de remoción en masa (ver Figura 8 (b)).

Con base únicamente en las imágenes satelitales, no se observan evidencias de medidas de mitigación para abordar la inestabilidad. Por el contrario, las fotografías posteriores muestran un crecimiento progresivo de vegetación que cubre el área afectada (Figura 8 (c)). En la última fotografía disponible antes del deslizamiento, tomada en mayo de 2023, se aprecia vegetación natural, sin señales de modificaciones o intervenciones correctivas aparentes (Figura 8 (d)).

El primer deslizamiento identificado a partir de las imágenes satelitales coincide temporalmente con la ampliación de la Ruta 150 para habilitar doble calzadas por sentido. Según información proporcionada por la SEREMI del Ministerio de Obras Públicas (MOP) de la Región del Biobío, dichos trabajos se llevaron a cabo entre abril de 2013 y septiembre de 2014. Cabe destacar que el proyecto había sido abandonado por la constructora responsable en julio de 2012, tras lo cual otra empresa asumió la continuación y finalización de las obras.

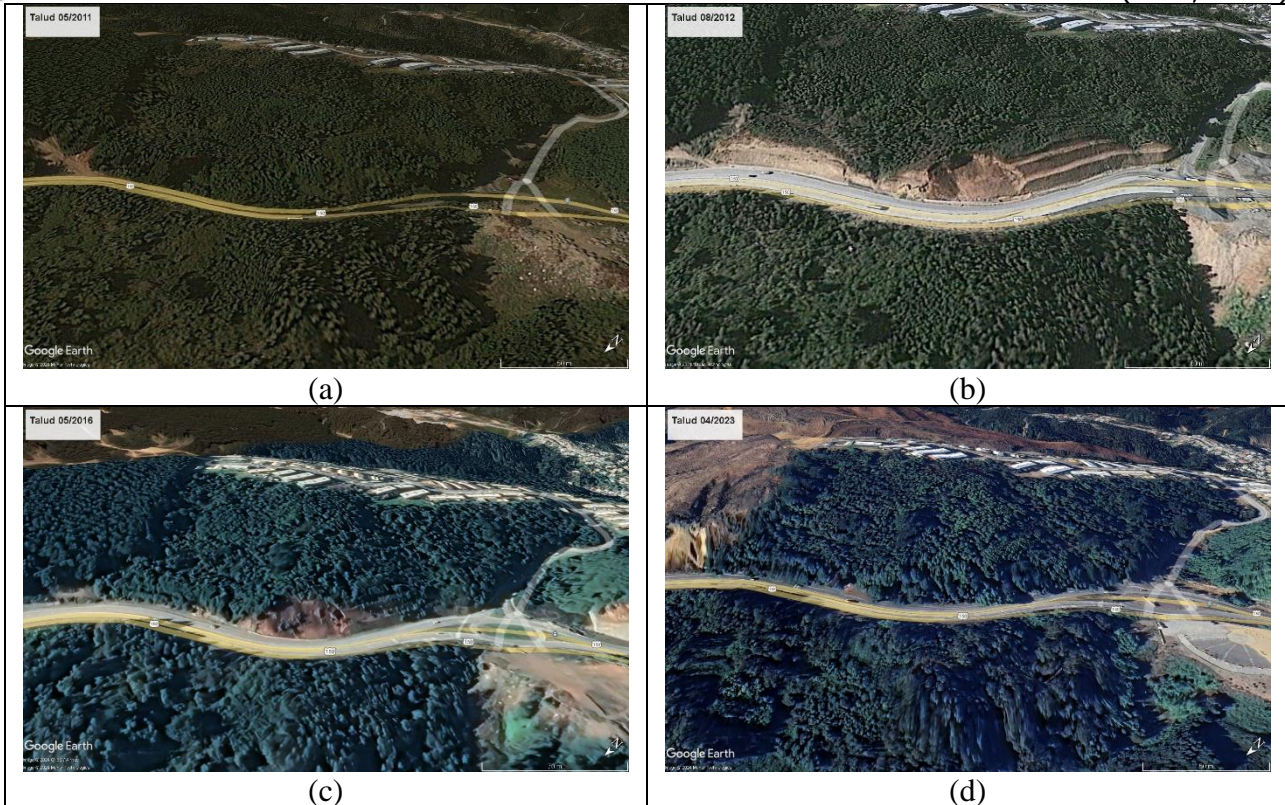


Figura 7: Imágenes satelitales a diferentes fechas para analizar la evolución de los movimientos y fallas del talud: (a) mayo de 2011\*, (b) agosto de 2012\*, (c) mayo de 2016\*, y (d) abril de 2023\*.

\*Modificadas de Google Earth Pro.

### 3. METODOLOGÍA

La evaluación de la estabilidad del talud fue efectuada mediante actividades de terreno, laboratorio y gabinete. A continuación, se resumen los procedimientos y materiales empleados para cumplir con el objetivo.

#### 3.1. Trabajo en terreno y laboratorio

Las exploraciones de terreno se llevaron a cabo en cuatro salidas a terreno (9 de agosto, 10 de septiembre, 15 de octubre y 11 de diciembre de 2024). La Figura 9 muestra fotografía aérea de la zona de estudio de abril de 2024 en donde se ubicaron los dos barrenos (B1 y B2). El barreno B1 fue realizado en el pie del talud (cota: 82 m), mientras que el B2 fue realizado a media ladera (cota: 94,5 m). En este trabajo se empleó la hipótesis de que la rotura del talud se debió a la elevada ubicación del nivel freático. La posición del nivel freático fue estimada colocando un piezómetro en el barreno B1, con la finalidad de registrar periódicamente la posición del nivel freático. Desafortunadamente, no fue posible la instalación de un piezómetro en el B2, dado el elevado tamaño del material encontrado durante su excavación.

**Tabla 3:** Información sobre exploraciones ejecutadas. \*SIRGAS 2000 - Huso 18

	Fecha	Coordenadas UTM*		Profundidad de exploración (m)	Observaciones
		NORTE (m)	ESTE (m)		
B1	10/09/2024	5936188,011	681002,279	3,15	Instalación de piezómetro
B2	15/10/2024	5936168,427	691024,491	1,00	Verificación de piezómetro

El 9 de agosto de 2024 se visitó por primera vez el área de estudio y se planificaron los ensayos, in situ y de laboratorio, a realizarse a lo largo de este trabajo. El barreno B1 (Figura (a) y (b)) fue efectuado el 10 de septiembre, mientras que el B2 el 15 de octubre (Figura (c)). En el barreno B1 se recogieron muestras de suelo

a diferentes profundidades para efectuar ensayos de laboratorio, así como instalar un piezómetro plástico de 3 metros de profundidad para monitorear la presencia y variación del nivel freático. El 11 de diciembre se midió el manto de las discontinuidades de la estructura heredada encontrada en el talud (Figura (d)). Esta última información fue utilizada para representar el comportamiento anisótropo en el modelo geotécnico.

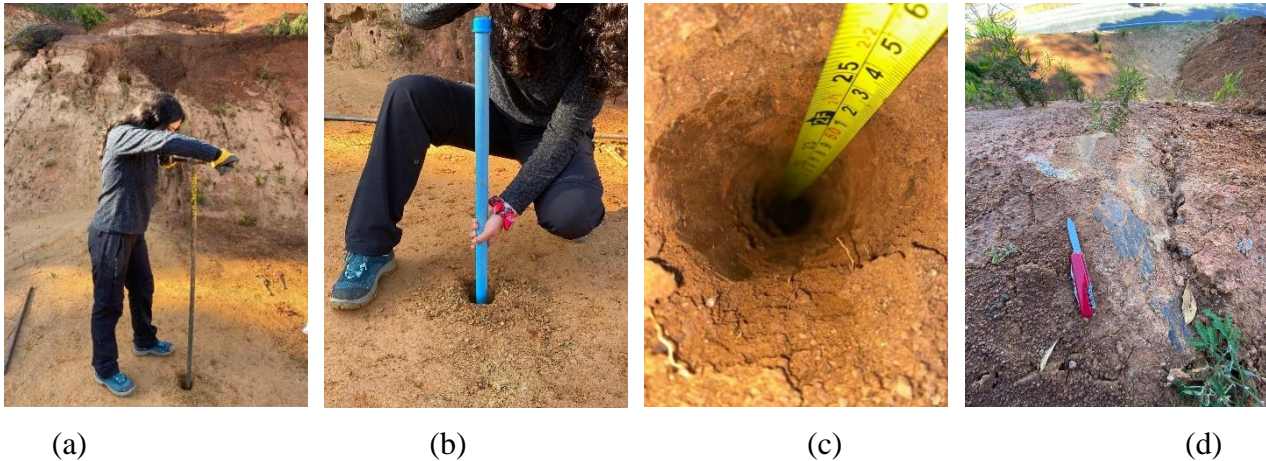


Figura 9: Fotografías en terreno (a) Ejecución Barreno 1 (b) Instalación de piezómetro en B1(c) Interior Barreno 2 (d) Medición de separación en estructuras heredadas.

Las excavaciones de los barrenos B1 y B2 fueron efectuadas en terrazas del talud ubicadas a distintas alturas con respecto al nivel de la calzada. El barreno B1 fue perforado hasta la cota 76,85 m (pie del talud o terraza uno), mientras que el B2 en la cota 94 m (media ladera o terraza cuatro). La ubicación en planta de cada uno de los barrenos, representadas en una fotografía aérea, se muestra en la Figura . Cabe señalar que el barreno B1 describió estratos más superficiales y alterados debido al proceso de retaluzado realizado en el pie del talud (terrazza uno), mientras que en el B2 se observó material menos afectado por procesos erosivos o de remoción, lo que la convierte en un área representativa de condiciones más estables y menos expuestas a la intervención externa.



Figura 10: Ubicación de las prospecciones realizadas en el talud. Generado con QGIS 3.34.8. en base a Ortofoto Lirquén (MOP, 2024).

En la Figura 1 se observa las cinco muestras ensayadas en el laboratorio con los ensayos de granulometría por tamizado (NCh 3236.Of 2010), plasticidad (NCh 1517/1. Of 79 y NCh 1517/2. Of 79), humedad natural (NCh 1515.Of 79) y gravedad específica (NCh 1532.Of 80). La Tabla 4 resume las profundidades de cada muestra ensayada en el laboratorio. En el barreno B1 se alcanzó una profundidad de 3,15 metros, mientras que en el B2 sólo pudo avanzarse hasta un metro por debajo de la superficie.

**Tabla 4:** Muestras extraídas desde el talud de estudio y sus cotas de profundidad.

Muestra	B1-01	B1-02	B1-03	B2-01	B2-02
Profundidad (m)	1,1 – 2,2	2,2– 2,9	2,9 – 3,2	0,0 – 0,5	0,5 – 1,0

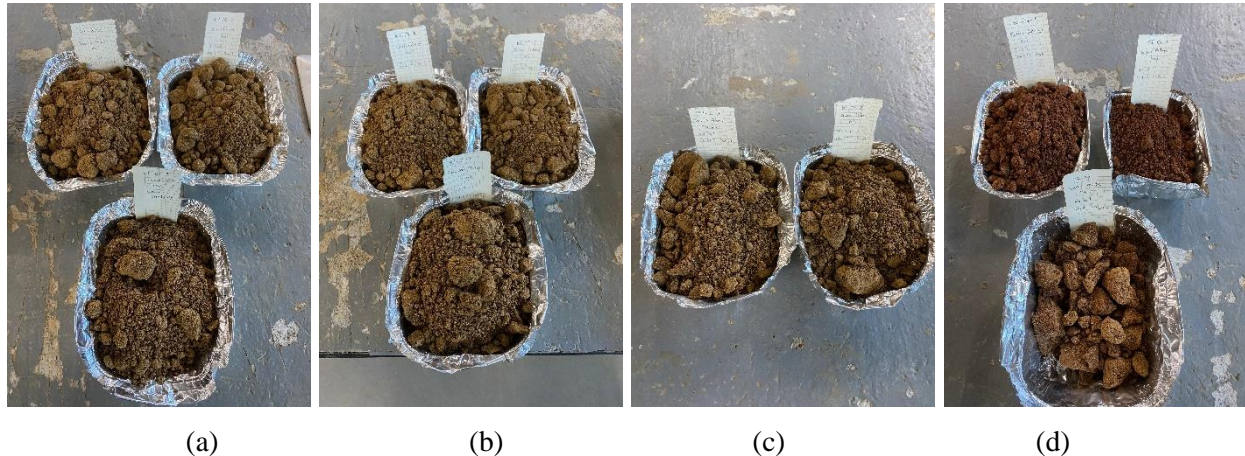


Figura 11: Muestras previo a control de humedad. (a) B1-01 (b) B1-02 (c) B1-03 (d) B2-01 (arriba) y B2-02 (abajo).

### 3.2. Gabinete

En este apartado se detalla la extracción de la topografía del sector posterior al actual deslizamiento y los métodos utilizados para evaluar la estabilidad global. Además, se explica la metodología a emplear para realizar el back análisis al talud en base a la topografía previa a este segundo deslizamiento.

#### 3.2.1. Topografía y evaluación de la estabilidad del talud

El Ministerio de Obras Públicas de la Región del Biobío proporcionó perfiles topográficos, una ortofoto y un modelo digital de elevación (DEM) de la zona de estudio. Esta información fue posterior al retaluzado realizado en el talud. El perfil topográfico previo al deslizamiento de 2023 y el actual, posterior al segundo deslizamiento se comparan para conocer el espesor de material perdido (Figura 2).

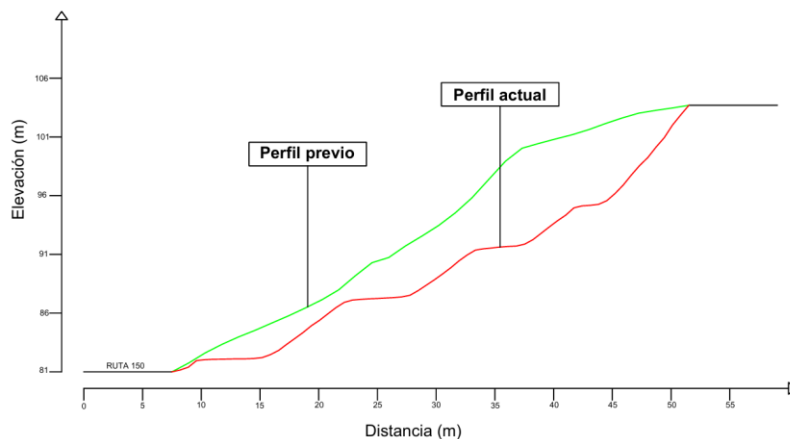


Figura 22: Comparación de perfil del talud de estudio previo al segundo deslizamiento y posterior al retaluzado del mismo. En base a Ortofoto Lirquén (MOP, 2024).

Los perfiles transversales para evaluar la estabilidad global del talud fueron obtenidos desde la ortofoto entregada por el MOP. En la **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**3 (a) se muestran los perfiles utilizados P1 y P2 para la evaluar el factor de seguridad únicamente en la zona afectada por la rotura del talud, mientras que en la Figura 13 (b) se visualiza la extensión del perfil P3, que abarca desde las casas de la población Ríos de Chile en la coronación del talud hasta el pie del talud en la ruta 150.

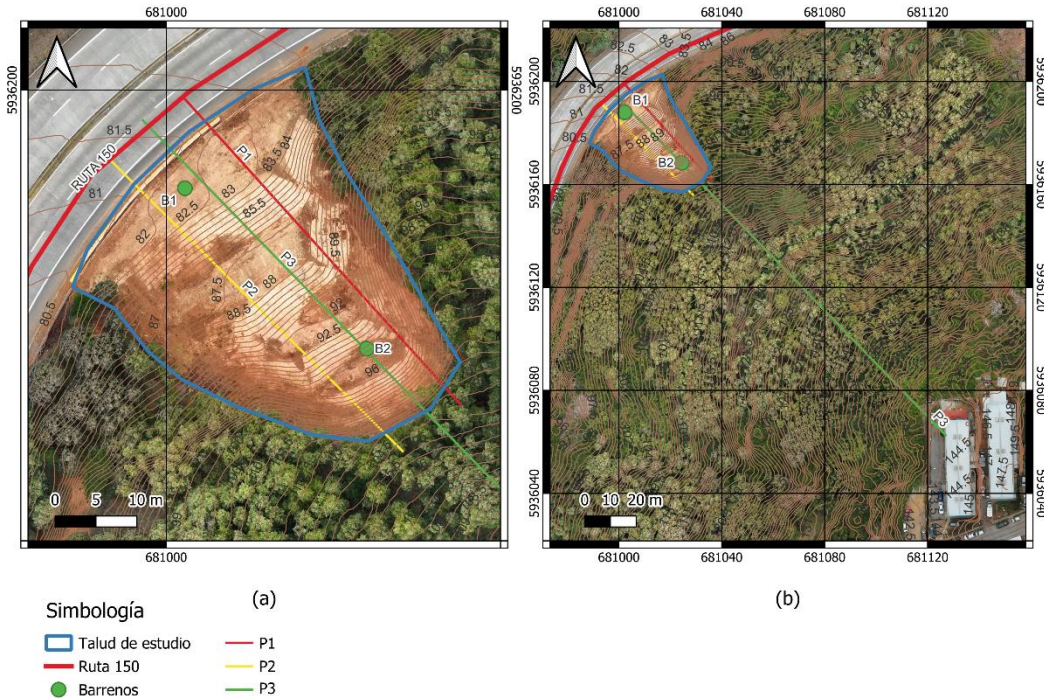


Figura 33: Ubicaciones de los perfiles definidos para estudio de estabilidad global (a) Ubicación de perfiles P1 y P2 (b) Ubicación de perfil P3. Generado con QGIS 3.34.8. en base a Ortofoto Lirquén (MOP, 2024).

La Figura 14 presenta los perfiles topográficos transversales utilizados en la evaluación de la estabilidad del talud mediante el software de equilibrio límite Slope/W de GeoStudio. El análisis se realizó aplicando el método de Morgenstern-Price, considerando que la relación entre las fuerzas interdovelas de corte y normal sigue una función medio seno. Para la simulación, se utilizó una superficie de deslizamiento circular, la cual representa un plano potencial de falla por esfuerzos cortantes que superan la resistencia del suelo. Los perfiles P1 y P2 (Figura 14 (a) y (b)) presentan alturas cercanas a los 25 metros, con inclinaciones entre  $25^\circ$  y  $30^\circ$ , mientras que el perfil P3 (Figura 14 (c)) alcanza aproximadamente 80 metros de altura, con una inclinación promedio de  $20^\circ$ . En los tres perfiles se incluye el nivel freático utilizado en el análisis, el cual se estimó en torno a los 3 a 4 metros de profundidad.

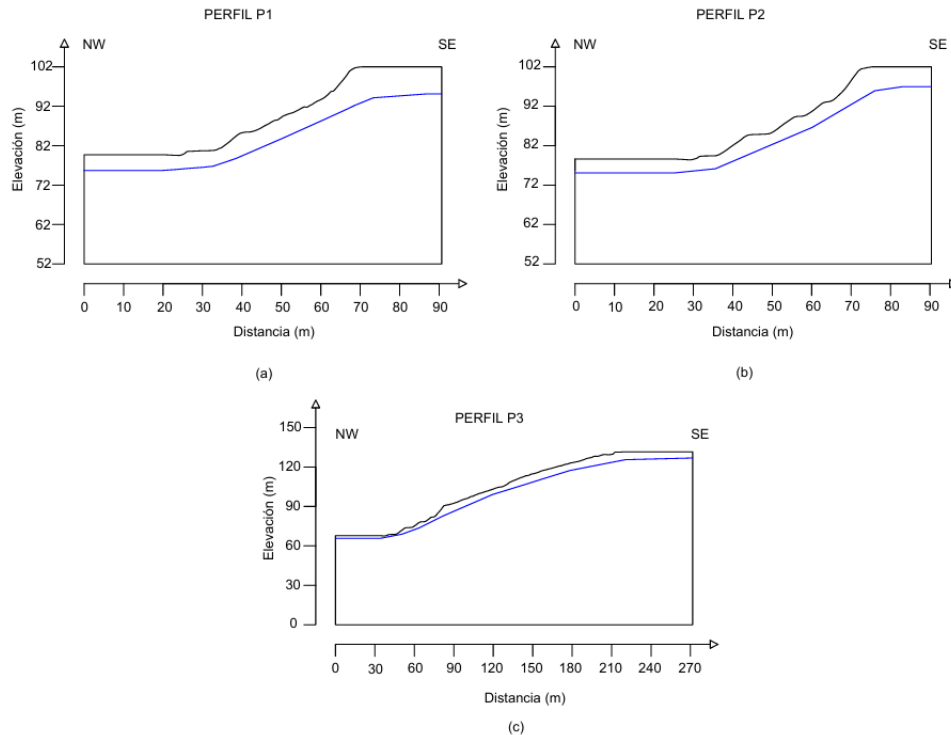


Figura 44: Cortes transversales del terreno empleados para evaluar la estabilidad global del talud con nivel freático utilizado en modelo. (a) Perfil P1 (b) Perfil P2 (c) Perfil P3

### 3.2.2. Back análisis de la situación original

El back-análisis de un talud tiene como objetivo estimar las condiciones geotécnicas presentes en el instante de su rotura. Este análisis estima factores como los parámetros resistentes de cada horizonte, la profundidad del nivel freático y la posible influencia de movimientos sísmicos, entre otros. La precisión del estudio depende directamente de la exactitud de la información recopilada previa al evento, especialmente del perfil topográfico del talud previo al deslizamiento. Además, es fundamental realizar una descripción detallada de los diferentes horizontes y estimar sus espesores aproximados antes del deslizamiento.

La observación efectuada en terreno sugiere que la rotura del talud fue provocada por la influencia de la posición del nivel freático con respecto al nivel de terreno. En consecuencia, el sismo no se consideró un factor explicativo del deslizamiento, ya que no se identificaron registros de actividad sísmica significativa durante el período estimado del evento. Por esta razón, el back-análisis se centró en evaluar la estabilidad bajo condiciones estáticas.

Una segunda observación fue efectuada en terreno, en donde se observó que el deslizamiento del talud pudo haberse producido por la influencia de un plano de debilidad paralelo a la pendiente del talud retaluzado dejado por el MOP posterior a la rotura. En consecuencia, se adoptó la hipótesis de cálculo en la que el deslizamiento de la masa de suelo se produjo, en parte, debido a este plano de debilidad. Las propiedades geomecánicas de ese plano fueron consideradas a partir de los resultados de Bustos (2020).

La metodología empleada para evaluar los posibles escenarios que pudieron haber causado la rotura consistió en variar el modelo de comportamiento del material afectado por el deslizamiento. Se consideraron cuatro escenarios de cálculo plausibles, diferenciados por el comportamiento isótropo o anisótropo, así como por los parámetros resistentes. El primer escenario asumió un material isótropo y homogéneo para el talud, mientras que, en los otros tres, se consideraron dos estratos en el que cada uno de ellos cuenta con un diferente grado de meteorización. Adicionalmente, en todos los casos se evaluó la influencia de la variación de la posición del nivel freático para alcanzar un factor de seguridad igual a la unidad.

En el modelo isótropo se asumieron propiedades geotécnicas uniformes e isótropas (Tabla 5) considerando el material constituyente del talud el saprolito de un granito meteorizado (Figura 15 (a)). Las superficies potenciales de deslizamiento en este escenario se limitaron exclusivamente a formas circulares. Por otro lado,

los modelos anisótropos consideraron una estratigrafía típica de un suelo residual (ver propuesta de Wesley (2010) en Figura 2), la cual también fue observada en terreno. Dichos modelos consideraron una estratigrafía de dos horizontes. El horizonte más superficial se encuentra completamente meteorizado con un espesor aproximadamente constante y paralelo a la pendiente de la ladera en la que subyace un segundo estrato de saprolito con un grado de meteorización menor al anterior. El saprolito observado en terreno presentó un espesor indeterminado, no habiéndose observado la roca fresca. Por tanto, en este estudio no se incluyó el efecto de la roca fresca en el modelo. La Figura 5 (b) muestra el modelo geotécnico empleado, en donde se indica la dirección de manto de las discontinuidades encontradas en terreno, las cuales se pueden ver a detalle en la Figura 9 (d).

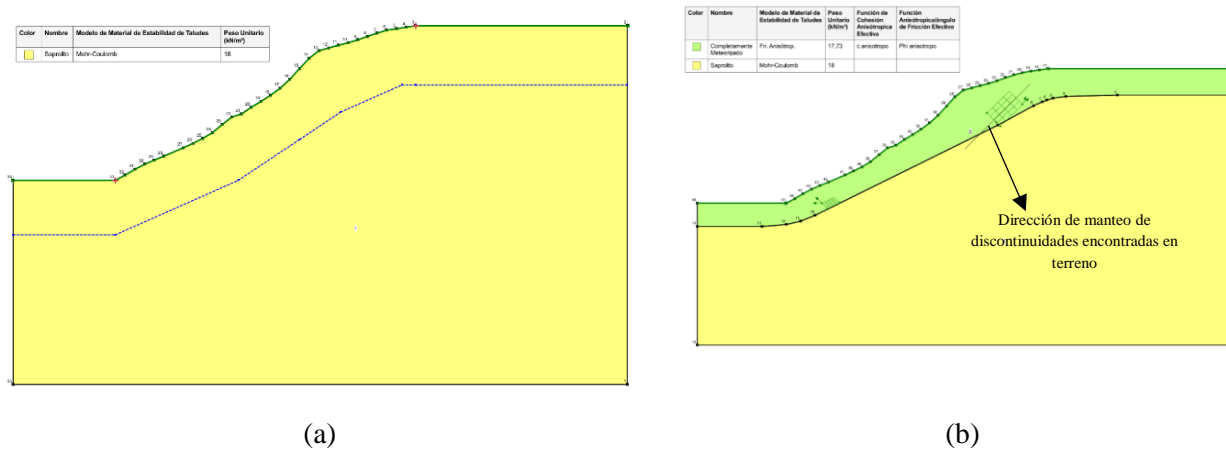


Figura 55: Modelos geotécnicos (a) material homogéneo e isotropo, (b) un estrato superficial más meteorizado y otro más resistente más abajo considerando anisotropía en el más superficial Bloque anisótropo utilizado en Back análisis. Generado con GeoStudio 2024.1.0.

### Superficie de deslizamiento y Especificar bloque

Para evaluar la anisotropía y considerar la dirección de buzamiento de las estructuras heredadas, se modifica la superficie de deslizamiento utilizando la opción "Bloque especificado", que permite definir manualmente las superficies de falla y adaptarlas a las condiciones específicas del sitio. Así, se posicionan bloques en la dirección de las estructuras encontradas in situ (Figura 15 (b)), simulando la superficie de deslizamiento que ocurrió. Esta herramienta resulta especialmente útil para analizar trayectorias de deslizamiento predefinidas, en particular en casos con geometrías conocidas o hipótesis específicas sobre la falla, como en taludes con estructuras anisotrópicas o geologías complejas (Seequent Limited, 2024). El procedimiento genera superficies potenciales de rotura, priorizando aquellas que se deslicen a lo largo de la estructura heredada.

### Criterio de rotura y Anisotropía

Para implementar anisotropía en el criterio de rotura de Mohr-Coulomb, se emplea la herramienta "Función Anisotrópica" la que corresponde a un modelo de resistencia general para tratar la anisotropía que puede utilizarse en 2D y 3D (Seequent Limited, 2024). En esta función, los parámetros de resistencia  $c'$  y  $\phi'$  se multiplican por un Factor Modificador que se define como una función de la inclinación  $\alpha$  (Figura 66).

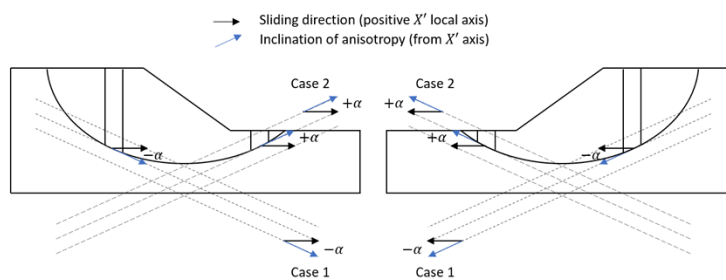


Figura 66: Definición de la inclinación  $\alpha$  respecto al eje local  $X'$  alineado con la dirección de deslizamiento: de izquierda a derecha y de derecha a izquierda. (Seequent Limited, 2024)

El Factor Modificador (FM) se define como la relación entre el valor del parámetro resistente en el plano estudiado y el valor correspondiente al suelo residual sin discontinuidades (Ecuación 4). En el caso de estudio, la resistencia predominante corresponde al material clasificado como "Completamente meteorizado", excepto en las orientaciones que coinciden con las estructuras heredadas ( $\pm 2^\circ$  de transición), donde la resistencia disminuye según el FM determinado. La Figura 17 presenta la variación del Factor Modificador en función de la orientación del plano, considerando la dirección de dichas estructuras. Por otra parte, en el caso de la cohesión, dada la ocurrencia de un segundo deslizamiento del talud, se adopta un valor de cohesión igual a "0", aunque se utiliza un valor de "0,1" en el modelo para evitar problemas de cálculo infinito en el programa. Por este motivo, la función anisotrópica de la cohesión se considera constante, con un Factor Modificador igual a "1" en todos los casos.

$$FM = \frac{\phi' \text{ Discontinuidad}}{\phi' \text{ Material "Completamente meteorizado"}} \quad (4)$$

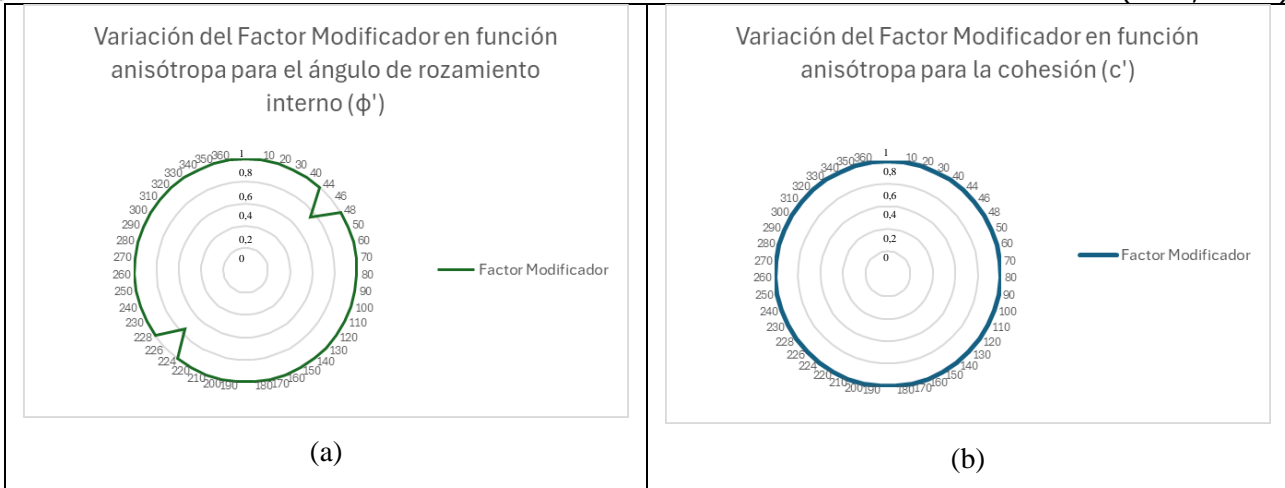


Figura 7: Variación del Factor modificador respecto a la inclinación utilizado en una función anisótropa lineal (a) ángulo de rozamiento interno ( $\phi$ ), y (b) cohesión (c)

### Resumen de los modelos y escenarios de cálculos

En consecuencia, se establecieron tres escenarios para el análisis en condiciones anisotrópicas, los cuales se presentan en la Tabla 5. El Caso 1 considera la modificación de los valores de  $c'$  y  $\phi'$  del material, manteniendo constante el Factor Modificador. El Caso 2 contempla la variación simultánea de  $c'$ ,  $\phi'$  y el Factor Modificador en función de las propiedades del material. Finalmente, el Caso 3 mantiene constantes los valores de  $c'$  y  $\phi'$ , mientras el Factor Modificador varía según la orientación de las discontinuidades.

**Tabla 5:** Resumen de modelos y escenarios de cálculo empleados en back-análisis.

Tipo de análisis	Caso	Superficie de deslizamiento	Modelo constitutivo	Valores $c'$ y $\phi'$	Discontinuidades	Estrato de suelo residual	Variación del nivel freático	Factor Modificador
Isótropo	-	Circular	Mohr-Coulomb	Constante	NO	NO	SI	-
Anisótropo	1	Bloque especificado	Mohr-Coulomb con Fn. Anisotrópica	Varía	SI	SI	SI	Constante
	2	Bloque especificado	Mohr-Coulomb con Fn. Anisotrópica	Varía	SI	SI	SI	Varía en base al material
	3	Bloque especificado	Mohr-Coulomb con Fn. Anisotrópica	Constante	SI	SI	SI	Varía en base a la discontinuidad

## 4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en este trabajo, en base a trabajo realizado en terreno, trabajo en laboratorio con las muestras extraídas y modelamiento en software GeoStudio 2024.1.0.

## 4.1. Salidas a terreno y ensayos de laboratorio

En base a la información recopilada en terreno, específicamente la profundidad alcanzada en los barrenos, se traza la división entre el material “Completamente meteorizado” y el “Saprolito”, asumiendo que debido a la imposibilidad de avance en la excavación se trata de un material de mejor calidad que el superficial (Figura ).

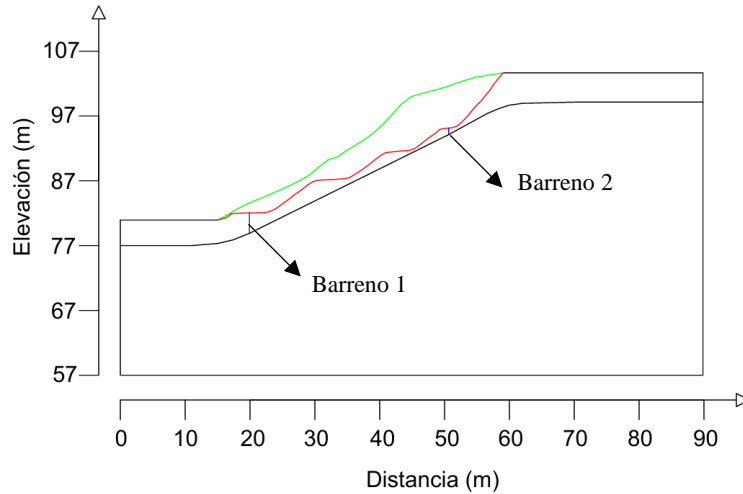


Figura 8: Consideraciones utilizadas para dibujar la división entre el material “Completamente meteorizado” y el “Saprolito”. En azul profundidad de barrenos realizados, en rojo perfil topográfico actual del talud y en verde perfil topográfico previo al segundo deslizamiento. Generado con AutoCAD 2025.

Los resultados de los ensayos se presentan en la Tabla 6. En el Barreno 1, a lo largo de su extensión, se identifica un limo de baja plasticidad. Por el contrario, el Barreno 2 corresponde a un limo de alta plasticidad, lo que refleja una variabilidad significativa en las propiedades del suelo entre ambos puntos de muestreo. Esto se explica debido a que el sector donde se realizó el primer barreno fue intervenido con maquinaria y el sector del segundo barreno se encontraba menos expuesto a intervención.

**Tabla 6:** Resultados de ensayos de laboratorio de muestras extraídas desde el talud.

	B1-01	B1-02	B1-03	B2-01	B2-02
Clasificación AASHTO	A4 (4)	A4 (3)	A4 (4)	A-7-5 (8)	A-7-6 (13)
Clasificación USCS	ML	ML	ML	MH	MH
IP	5	6	7	14	17
Gs	2,70	2,68	2,57	2,63	2,56
Humedad (%)	29,3	28,0	30,5	32,5	27,1
% Finos	71	60	63	60	68
Tamaño Max (mm)	2	2	2	2	2

En base a esta información, y en conjunto con parámetros entregados por autores en sectores de similares características y cercanos al área, se construye el modelo geotécnico del talud (Tabla 7). Bustos (2020) entrega parámetros de resistencia para un material determinado como limo de baja plasticidad (maicillo) ubicado en la Ruta O-300 en Tomé, en este estudio, se utilizan para el material “Completamente meteorizado”. Además, entrega parámetros para las discontinuidades identificadas como estructuras heredadas las cuales, de igual forma, se utilizarán en este trabajo. Valenzuela (2009) entrega parámetros resistentes para variados suelos residuales de Concepción, en este estudio, se utilizan los valores obtenidos en el sector “Camino a Penco” para el material “Saprolito”, en conjunto con valores entregados por Remavesa S.A. (2014) correspondientes a la Memoria de cálculo del Muro Permanente N°1 cercano al talud de estudio. Cabe mencionar que para el modelo se han utilizado exclusivamente los valores críticos, ya que como se trata de un segundo deslizamiento en el talud, este ya alcanzó suficiente deformación como para estabilizar su resistencia al corte.

**Tabla 7:** Parámetros de los estratos (en base a Bustos (2020), Valenzuela (2009) y Remavesa S.A. (2014))

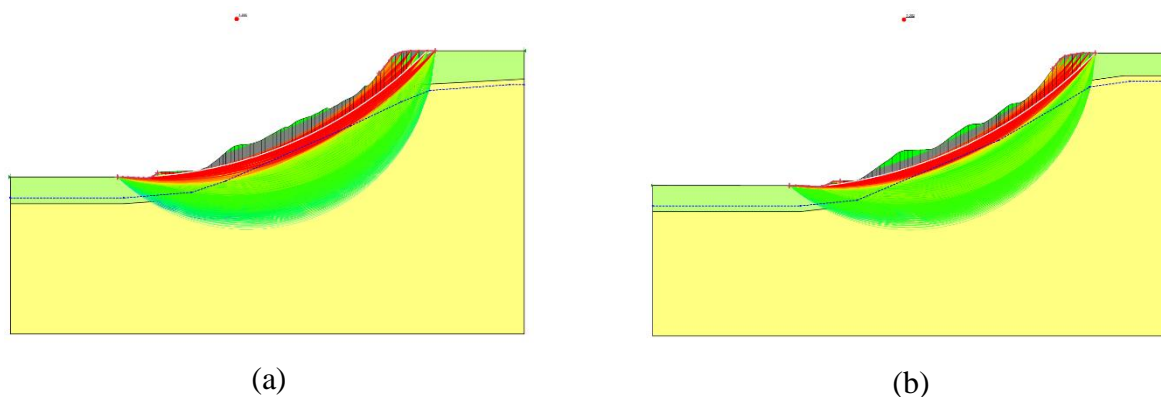
	Parámetro	Símbolo	Unidad	Parámetros del modelo Mohr-Coulomb	
				Máximos	Críticos
Saprolito	Ángulo de rozamiento interno	$\phi$	°	-	29
	Cohesión	c	kPa	-	21
	Peso unitario	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	18	
Completamente meteorizado	Ángulo de rozamiento interno	$\phi$	°	24,7	27,5
	Cohesión	c	kPa	45,4	0
	Peso unitario	$\gamma$	kN/m <sup>3</sup>	17,73	
Discontinuidades	Ángulo de rozamiento interno	$\phi$	°	22,8	20,7
	Cohesión	c	kPa	11	0

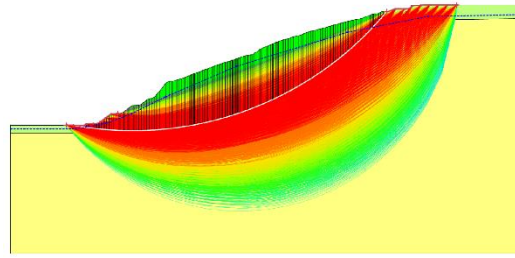
## 4.2. Gabinete

Con la información entregada por MOP Región del Biobío y la obtenida en terreno, se procede al trabajo de gabinete, en donde se evalúa la estabilidad local y global del talud, y el back-análisis de la situación original del talud, ambos en los casos propuestos y descritos previamente.

### 4.2.1. Evaluación de la estabilidad del talud

Con los perfiles creados en base al modelo de elevación y el modelo geotécnico construido, se modelan los tres casos propuestos en el software GeoStudio 2024.1.0 (Figura 19). En este caso, a pesar de evaluarlo mediante isotropía (sin considerar las estructuras heredadas), se proponen dos materiales al igual que el caso anisótropo, extrapolar la profundidad del segundo material para todos los casos. El nivel freático fue evaluado entre 2 a 4 metros de profundidad, cercano al sector en donde se produce la superficie de falla, siendo extrapolado de igual forma a todos los casos. Se resumen los resultados de Factor de Seguridad (FS) en la Tabla 8. En general, los resultados obtenidos se encuentran al límite de la estabilidad, en el caso del Perfil 3, que comprende desde el pie del talud hasta la población Ríos de Chile, se debe recabar mayor información para mayor representabilidad. Como se mencionó anteriormente, este modelo fue construido en base a extrapolación de información obtenida en el talud de estudio, representativo en los perfiles 1 y 2.





(c)

Figura 19: Output Slope/W de modelos en base a los tres casos propuestos para estudio de estabilidad local y global del talud en diciembre 2024. (a) Perfil 1 (b) Perfil 2 (c) Perfil 3

**Tabla 8:** Resultados de FS según perfil de estudio.

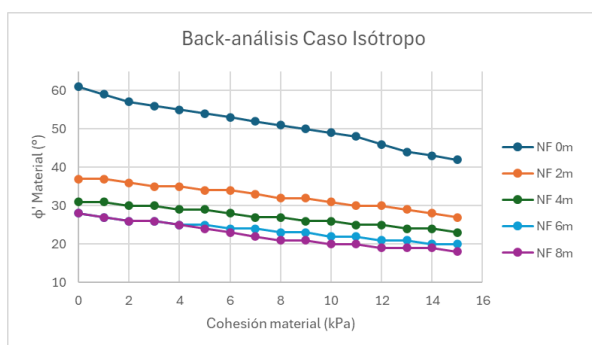
Perfil	FS
P1	1,033
P2	1,002
P3	1,047

#### 4.2.2. Back-análisis de la situación original

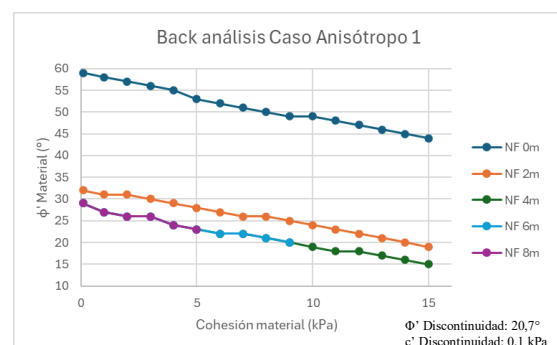
Los resultados de los casos de back-análisis se presentan desde el caso más simplificado (Isótropo) hasta el caso que se aproxima de mejor forma a la realidad (Anisótropo en 3 casos). En todos los casos, se indica la variación del ángulo de rozamiento interno y la cohesión bajo los distintos escenarios de nivel freático para alcanzar un factor de seguridad igual a la unidad. Se evaluó cohesión entre 0,1 y 15 kPa. En ocasiones no se presentan valores asociados a ciertas iteraciones, esto se debe a casos donde los valores necesarios para alcanzar la estabilidad son imposibles con las condiciones propuestas. En el caso de que en el terreno se encuentre un material con un par de valores de ángulo de rozamiento interno y cohesión por debajo de la curva del respectivo nivel freático se produciría la falla del talud.

##### 4.2.2.1. Isótropo

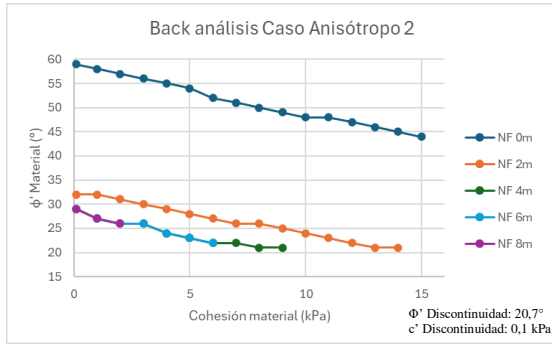
La Figura 20 (a) **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra el resultado de las iteraciones en el caso isótropo. El ángulo de rozamiento interno fluctúa entre 18 y 61° y la cohesión se evalúa hasta 15 kPa. Como se esperan valores de entre 25-30° para este parámetro, y valores cercanos a 0 para la cohesión, se estima que el nivel freático en este caso estaría bordeando los 4 a 6 metros de profundidad. Los resultados para niveles freáticos bajo los seis metros de profundidad se comportan de forma similar, lo que indica que, a esta profundidad, el nivel freático no influye en la estabilidad global del talud.



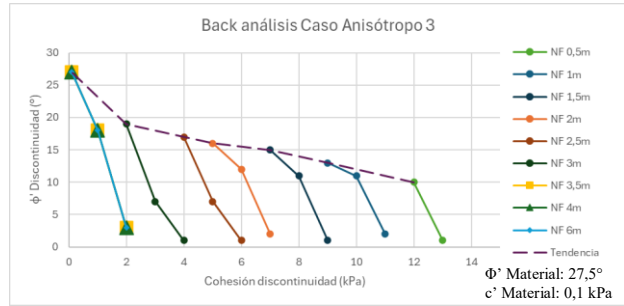
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9: Back análisis efectuados en diferentes escenarios de cálculo, variando el nivel freático: (a) isótropo, (b) anisótropo 1, (c) anisótropo 2, (d) Anisótropo 3.

#### 4.2.2.2. Anisótropo

En la Figura 21 (b) y (c) se exponen los resultados de los Casos 1 y 2 de Anisotropía respectivamente. En el Caso 1 se modifican los valores  $c'$  y  $\phi'$  del material, pero se mantiene constante el Factor Modificador. Los valores de ángulo de rozamiento interno varían desde  $15^\circ$  a  $59^\circ$  y la cohesión se evalúa hasta los 15 kPa. Como ya se mencionó, se esperan valores de entre  $25-30^\circ$  para este parámetro, y valores cercanos a 0 para la cohesión, se estima que el nivel freático en este caso estaría bordeando los 4 a 8 metros de profundidad. Sin embargo, los resultados indican que a esa profundidad el nivel freático ya no juega un papel importante en la estabilidad del talud. En el Caso 2 se modifican los valores  $c'$  y  $\phi'$  del material, y se varía el Factor Modificador en relación con el material. Aquí los resultados para el ángulo de rozamiento interno varían desde  $21^\circ$  a  $59^\circ$  y la cohesión se evalúa hasta los 15 kPa, aunque en algunos casos no es posible. Al igual que el Caso 1, los niveles freáticos con profundidades de 4, 6 y 8 metros comparten valores en todas las iteraciones. Se presume, de igual forma, que llegada cierta profundidad el nivel freático deja de ser un factor influyente dentro de la superficie de deslizamiento.

En el Caso 3 se mantienen como valores constantes  $c'$  y  $\phi'$  del material, pero se varía el Factor Modificador en relación con la discontinuidad (Figura 21 (d)). Los resultados son diferentes a lo evaluado previamente, con valores para el ángulo de rozamiento interno entre  $1^\circ$  y  $27^\circ$  y cohesiones de hasta 13 kPa. Bajo 3.5 metros de profundidad se comparte una tendencia, lo que indica que bajo esta profundidad el nivel freático deja de influir en la estabilidad del talud. Además, se traza una línea de tendencia en los valores máximos de ángulo de rozamiento interno, la cual indica que a medida que aumenta la profundidad del nivel freático, mayores deben ser los valores de estos para alcanzar la estabilidad y menor debe ser la cohesión.

### 5. CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que el talud analizado se vio afectado por una remoción en masa de tipo rotacional. Los materiales que lo componen son dos: una capa de material completamente meteorizado, caracterizada por estructuras heredadas con un buzamiento de  $46^\circ$  en dirección noroeste (misma dirección de la cara del talud), y una capa subyacente de saprolito con un menor grado de meteorización. Los análisis indican que el talud se encuentra actualmente estable, con factores de seguridad (FS) cercanos a 1 en los tres escenarios propuestos. Sin embargo, estos valores están al límite del valor admisible e incluso, en la corona del talud se registran nuevos deslizamientos a menor escala. Se sugiere la necesidad de mejorar el modelo para abarcar el caso de mayor alcance, perfil topográfico P3, en donde se extrapola información desde el talud, para representar de mejor forma la estabilidad global.

El back análisis realizado revela que el colapso del talud ocurrió al superarse los 3,5 metros de profundidad del nivel freático, coincidiendo con el cambio de material. Este resultado se respalda con la presencia de óxido de manganeso en las discontinuidades observadas, lo que indica flujo de agua a través de estas estructuras.

El análisis evidencia que incluir las discontinuidades en los modelos proporciona una visión más precisa de la estabilidad del talud. Se subraya la importancia de realizar ensayos geotécnicos especializados para caracterizar adecuadamente los materiales involucrados, además de implementar el análisis sísmico. Se



**UCSC**

Simposio de Habilitación Profesional  
Departamento de Ingeniería Civil  
(abril, 2025)

recomienda implementar un monitoreo continuo del nivel freático para prever posibles deslizamientos y garantizar la seguridad en la zona, e incluir medidas de mitigación para controlar los pequeños deslizamientos que siguen ocurriendo en la corona del talud.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Aydin, A. (2006). Stability of saprolitic slopes: nature and role of field scale heterogeneities. *Natural Hazards and Earth System Science*, 89-96.
- Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (Quinta ed.). McGraw-Hill.
- Budhu, M. (2011). *Soil Mechanics and Foundations* (Tercera ed.). Wiley.
- Bustos, S., King, R., Lapeña, P., & Montenegro, J. (2020). *Estudio de metodología de muestreo y caracterización geotécnica de suelo residual con estructuras heredadas, PK-1,740 Ruta O-300 Bellavista, Tomé. Región del Biobío (Tesis de Pregrado)*. Concepción: Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- Chowdhury, R., & Chowdhury, P. M. (2008). *Geotechnical Slope Analysis*. CRC Press (Taylor & Francis Group).
- Coulomb, C. A. (1776). *Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de .*
- Craig, R. F. (2004). *Craig's Soil Mechanics* (Séptima ed.). London: Spon Press.
- Cruden, D. (1991). *A simple definition of a landslide*. Paris.
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes. *Transportation Research Board, National Academy of Sciences*, 247, (págs. 36-75).
- Das, B. M. (2013). *Principles of geotechnical engineering* (Octava ed.). Cengage Learning.
- Deere, D. U., & Patton, F. D. (1971). Slope stability in residual soil slopes. *Proceedings of the 4th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Engineering Foundation* (págs. 87-170). New York: American Society of Engineers.
- Díaz, J. S. (2020). *Deslizamientos, Volumen I: Analisis geotécnico*. Colombia: División de Publicaciones UIS.
- Díaz, M., & Sepúlveda, S. (2012). Procesos geomorfológicos en regiones montañosas. *Revista Geológica de Chile*, 23-35.
- Dirección General de Aeronáutica Civil. (2024). *Dirección Meteorológica de Chile - Servicios Climáticos*. Obtenido de <https://climatologia.meteochile.gob.cl/application/anual/aguaCaidaAnual/360019/2023>
- Duncan, J. M. (2014). *Fundamentals of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils*. Wiley.
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.
- Duncan, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. Wiley.
- Earle, S. (2019). *Physical Geology* (Vol. II).
- Geología de Campo II. (2008). Mapa Geológico del Sector Menque Concepción.
- González de Vallejo. (2002). *Ingeniería Geológica*.
- Goodman, R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics*. New York: John Wiley & Sons.
- Hutchinson, J. N. (1968). Landslides: Analysis and Control. En R. L. Schuster, & R. M. Krizek (Edits.). Washington, D.C.: National Academy of Sciences.

- McKenzie, L. (2016). Relict structure in saprolite - a case study. *Australian Centre for Geomechanics*.
- Mohr, O. (1900). *Welche Umstände bedingen die Elastizitätsgrenze und den Bruch eines Materials?* *Zeitschrift*.
- OPTUM Computational Engineering. (2016). *OPTUM Analysis*.
- Remavesa S.A. (2014). *Terminación, ampliación y reposición Ruta 150, Lirquén - Quebrada Honda. Región del Biobío*.
- Seequent Limited. (2024). *Stability Modeling with GeoStudio*. The Bentley Subsurface Company.
- SERNAGEOMIN. (2003). Mapa geológico de la Región del Biobío.
- SERNAGEOMIN. (2011). Evaluación preliminar de Peligros Geológicos: Área Ciudad de Penco.
- Spink, G. M., & Norbury, D. R. (1993). *Soil Mechanics for Highways*. Blackie Academic & Professional.
- Suárez, J. (2009). *Deslizamientos. Volumen 1: Análisis Geotécnico*. Colombia: División de Publicaciones UIS.
- Tarbut, E. J., Lutgens, F. K., & Linneman, S. R. (2020). *Earth: An introduction to physical geology* (Vol. 30). Hoboken: Pearson Education, Inc.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (Tercera ed.). Wiley.
- Valenzuela, M. (2009). Caracterización geotécnica y resistencia al corte de los suelos residuales de Concepción. *V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*.
- Varnes, D. J. (1958). Landslide types and processes. *Landslides in Engineering Practice*, (págs. 20-47).
- Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Landslides: analysis and control* (págs. 11-33). Transportation Research Board.
- Villalobos, C., Araya, T., & López, R. (2016). Evaluación de estabilidad de taludes en zonas sísmicas. *Revista Ingeniería Geotécnica*, 45-59.
- Wesley, L. D. (2010). *Fundamentals of soil mechanics for sedimentary and residual soils*. Canada: Wiley.
- Wesley, L. D. (2010). *Geotechnical engineering in residual soils*. Hoboken, New Jersey: Wiley.
- Wesley, L. D., & Irfan, T. Y. (2012). *Mechanics of residual soils: Classification of residual soils*. (G. E. Blight, Ed.)
- Zienkiewicz, O. C., & Taylor, R. L. (2000). *The Finite Element Method*. Butterworth-Heinemann.