

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. GENERALIDADES.

La estabilidad de taludes es un aspecto fundamental en la ingeniería geotécnica y la construcción, ya que la inestabilidad de laderas y pendientes puede tener consecuencias devastadoras en términos de seguridad pública y económica. La capacidad de prever y mitigar el colapso de taludes es esencial para garantizar la integridad de estructuras, carreteras, infraestructuras y la seguridad de las personas que habitan en zonas de riesgo.

Dentro de este contexto, el método de dovelas se presenta como una herramienta valiosa para el análisis y diseño de taludes. Este método, proporciona un enfoque ingenioso y eficiente para evaluar la estabilidad de taludes basándose en la teoría de equilibrio límite. A través de la división del talud en segmentos discretos, denominados dovelas y la identificación de las superficies de fallas potenciales, se puede obtener una visión más precisa de los modos de falla posibles y las fuerzas que actúan en el talud.

La utilización del método de dovelas implica una combinación de conocimientos geotécnicos, mecánica de suelos y matemáticas. Al segmentar el talud en dovelas y considerar diferentes condiciones de carga y resistencia en cada una, se puede determinar el factor de seguridad global y evaluar la viabilidad de la ladera en términos de estabilidad.

En el presente trabajo, se busca explorar en profundidad el método de dovelas aplicado a la estabilidad de taludes en la región de Tarija, Bolivia. Se analizarán los factores topográficos y mecánica de suelos específicos de la zona, que influyen en la estabilidad de los taludes.

El objetivo de esta investigación es proporcionar una comprensión sólida de la metodología de dovelas y su aplicación en la evaluación de la estabilidad de taludes en la zona de Cochas – Falda La Queñua del departamento de Tarija. A través del análisis detallado de casos concretos y la interpretación de los resultados obtenidos.

En resumen, esta tesis se adentra en el apasionante campo de la estabilidad de taludes mediante el enfoque del método de dovelas, buscando mejorar nuestra comprensión de cómo abordar uno de los desafíos más críticos en la ingeniería y brindar soluciones efectivas para la prevención de deslizamientos y colapsos en las laderas de Tarija, Bolivia.

1.2. JUSTIFICACIÓN.

El presente trabajo propone evaluar el factor de seguridad por el método de dovelas en taludes considerando un tramo de Falda La Queñua; con el fin de plantear una alternativa de mitigación de fallas. Es de vital importancia porque se podrá evitar en el futuro deslizamiento que perjudiquen el libre tránsito por la carretera que conecta el departamento de Tarija con el norte del país.

Al término de este proyecto se podrá establecer qué consideraciones se debe tener al momento de enfrentar un problema por desprendimiento de talud o deslizamientos que puedan afectar a la estructura existente y para ello se busca determinar los parámetros físico mecánicos del suelo "in situ" y se pueda identificar el grado de inestabilidad y posterior sugerencia acerca del tipo de estructura que estabilice el talud crítico.

Riesgos geotécnicos y seguridad pública.

La inestabilidad de taludes puede causar deslizamientos y colapsos que ponen en peligro la vida de las personas que transitan la zona. La investigación en este tema es crucial para desarrollar métodos más precisos de análisis y diseño que contribuyan a prevenir tragedias y mejorar la seguridad pública.

Impacto en la infraestructura.

Los deslizamientos y colapsos de taludes pueden dañar infraestructuras críticas como carreteras, vías férreas, edificios y redes de servicios públicos. La investigación en estabilidad de taludes contribuye a diseñar infraestructuras más resistentes y a tomar medidas preventivas que reduzcan el impacto económico de estos eventos.

1.3. HIPÓTESIS.

La implementación del método de dovelas para analizar la estabilidad de taludes en la región ofrecerá resultados precisos y pertinentes, permitiendo evaluar la condición actual de los taludes del tramo. Se espera que los resultados obtenidos faciliten la toma de decisiones informadas sobre las medidas de mitigación más adecuadas para prevenir deslizamientos y colapsos en las laderas de la región. La aplicación efectiva de estas medidas mejorará la seguridad vial, contribuyendo al desarrollo sostenible y la reducción de riesgos en Tarija, Bolivia.

Se plantea la siguiente hipótesis:

“El factor de seguridad define la condición actual de los taludes del tramo”

1.4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

1.4.1. Situación problemática.

La inestabilidad de los taludes en la Falda La Queñua, Tarija, Bolivia, se genera por una combinación de factores geológicos, hidrológicos y humanos. Las condiciones geológicas, como la presencia de materiales sueltos o fracturados y la inclinación de las capas del suelo, contribuyen significativamente a la propensión al deslizamiento. Además, la infiltración de agua de lluvias intensas o riego mal gestionado puede saturar el suelo, aumentando la presión de poros y disminuyendo la cohesión del material.

La actividad humana, como la construcción de carreteras y edificios sin un adecuado estudio geotécnico, puede alterar el equilibrio natural del talud, creando puntos de debilidad. Sin una evaluación detallada y medidas de mitigación adecuadas, estos factores pueden combinarse para desencadenar deslizamientos que comprometen la seguridad de la infraestructura y las vidas humanas.

Por lo tanto, la situación problemática en esta tesis busca identificar estos factores y proponer soluciones para mejorar la estabilidad del talud y prevenir futuros desastres.

Es necesario evaluar la estabilidad de taludes en la Falda La Queñua para evitar derrumbes. Al momento de evaluar los taludes del tramo de estudio se realizará distintos ensayos que permitirán determinar el factor de seguridad.

- **Delimitación temporal.**

El presente trabajo de investigación está definido en tiempo presente, porque si no se da solución al deslizamiento a tiempo éste puede presentar fallas que se podían haber previsto antes de causar deterioros y otros incidentes.

- **Delimitación espacial.**

El área temática está referida a la obtención del factor de seguridad del talud, donde se estudiará las propiedades mecánicas según el tipo de material del talud.

La base de operaciones será en la Falda La Queñua entre las progresivas (18+019–23+167). Los ensayos de caracterización del suelo se realizarán en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Figura 1.1 Ubicación de área de estudio



Fuente: Elaboración propia (Google Earth)

1.4.2. Formulación del problema.

¿De qué manera, una evaluación del factor de seguridad de taludes determina su condición actual?

1.5. OBJETIVOS.

1.5.1. Objetivo general.

Evaluar el factor de seguridad en taludes utilizando el método de dovelas, específicamente en un tramo de la Falda La Queñua, para desarrollar una alternativa de mitigación de fallas.

1.5.2. Objetivos específicos.

- Identificar Taludes que requieren estabilización en el tramo Cochas - Túnel Falda La Queñua, priorizando según el nivel de riesgo y las consecuencias potenciales de la inestabilidad.
- Realizar un estudio detallado de mecánica de suelos para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los taludes, garantizando datos precisos para el análisis.
- Medir y analizar los aspectos topográficos del talud, incluyendo pendientes, elevaciones y distancia, para entender mejor las condiciones geográficas y su influencia en la estabilidad.
- Evaluar el Factor de Seguridad: aplicando el método de dovelas, determinando la capacidad del talud para resistir el deslizamiento y proponiendo alternativas de estabilización si es necesario.

1.6. ALCANCE DEL ESTUDIO.

Un factor importante en la estabilidad de taludes es conocer las propiedades geométricas y mecánicas del suelo con los cuales se definirá el factor de seguridad del talud por el método de dovelas “nivel de investigación - descriptivo”.

El factor de seguridad en taludes no es manipulable “diseño de la investigación – no experimental”.

El diseño se realizará a cada variable que influye en los deslizamientos de taludes “diseño transeccional descriptivo”.

El presente estudio se enfoca en determinar el factor de seguridad de los taludes, las opciones aplicables de estabilización. La alternativa de solución presentada deberá responder satisfactoriamente a todas las necesidades de solución a la estabilidad de taludes.

Se procederá a la recopilación de toda la información relevante para el desarrollo del proyecto y el análisis de la alternativa de solución para la estabilización de los taludes; esto implica desde la topografía para conocer la geometría de los taludes, estudio de suelos necesario conocer las características geotécnicas del lugar de proyecto.

Se procederá a realizar un análisis de estabilidad de los taludes, mediante el programa Slide 6.0 se determinará el factor de seguridad de cada talud.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

Para comprender más la importancia del presente proyecto de investigación, se consideran algunos conceptos esenciales como ser:

2.1. DEFINICIÓN DE ESTABILIDAD.

Se entiende por estabilidad a la seguridad de una masa de suelo contra la falla o movimiento.

La estabilidad de una masa de suelo se refiere a su capacidad para resistir la falla o el movimiento. En el contexto de la ingeniería geotécnica, la estabilidad de una masa de suelo se evalúa considerando factores como la resistencia del suelo, la geometría del talud y las cargas aplicadas.

2.2. DEFINICIÓN DE TALUD.

Un talud es toda masa de suelo que presenta una inclinación con respecto a la horizontal del terreno. Los taludes no pueden ser considerados indefinidamente como estables a lo largo del tiempo ya que existen factores que influyen a la inestabilidad en taludes.

Los taludes pueden ser de origen natural (laderas) o artificial (talud), la inestabilidad de un talud se presenta tanto en taludes como laderas.

Según (ABC Geotechnical Consulting, 2022). La definición de talud corresponde a una superficie o plano inclinado, se puede encontrar de manera natural o como una formación antrópica. También se define talud como la acumulación de materiales rocosos y suelos acumulados a los pies de una pendiente. Suelen ser estructuras compuestas del mismo material presente en el suelo, roca, concreto armado u otro que pueda contener la presión ocasionada por el suelo.

2.3. TIPO DE TALUDES.

Según (Suárez, 2009, p. 3). En la literatura técnica se define como “ladera” cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y “talud” cuando se conformó artificialmente.

2.3.1. Taludes naturales.

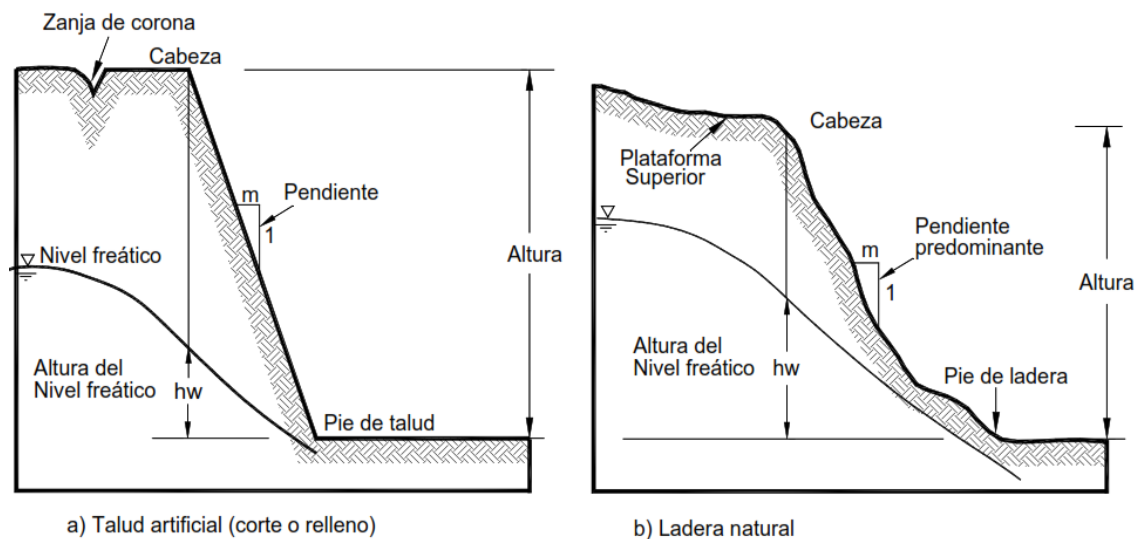
Un talud natural se refiere a una pendiente o inclinación de terreno que se forma de manera natural debido a la acción de procesos geológicos, como la erosión, la gravedad o la acumulación de sedimentos. Esta inclinación puede ser suave o pronunciada y puede encontrarse en diferentes entornos geográficos como montañas, colinas o laderas.

2.3.2. Taludes artificiales.

Un talud artificial se refiere a una pendiente o inclinación de terreno que ha sido construida por el ser humano a través de obras de ingeniería. A diferencia de un talud natural que se forma de manera espontánea debido a procesos geológicos, un talud artificial requiere intervención humana para su construcción.

2.4. PARTES DE UN TALUD.

Figura 2.1 Partes de un talud



Fuente: Análisis geotécnico (Suárez, 2009)

Según (Suárez, 2009, p. 4). En el talud se define los siguientes elementos constitutivos:

- **Pie, pata o base.**

El pie corresponde al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte inferior del talud o ladera. La forma del pie de una ladera es generalmente cóncava.

- **Cabeza, cresta, cima o escarpe.**

Cabeza se refiere al sitio de cambio brusco de la pendiente en la parte superior del talud o ladera. Cuando la pendiente de este punto hacia abajo es semivertical o de alta pendiente, se le denomina “escarpe”. Los escarpes pueden coincidir con coronas de deslizamientos. La forma de la cabeza generalmente es convexa.

- **Altura.**

Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza generalmente no son accidentes topográficos bien marcados.

- **Altura de nivel freático.**

Es la distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua (la presión en el agua es igual a la presión atmosférica). La altura del nivel freático se acostumbra medirla debajo de la cabeza del talud.

- **Pendiente.**

Es la medida de la inclinación de la superficie del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación m:1, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical. Ejemplo: $45^\circ = 100\% = 1H:1V$.

Los suelos o rocas más resistentes generalmente forman laderas de mayor pendiente y los materiales de baja resistencia o blandos, tienden a formar laderas de baja pendiente.

2.5. DEFINICIÓN DE DESLIZAMIENTO.

Según (De Matteis, 2003, p. 5). Se denomina deslizamiento a la rotura y al desplazamiento del suelo situado debajo de un talud, que origina un movimiento hacia abajo y hacia fuera de toda la masa que participa del mismo.

Los deslizamientos suelen suceder en forma rápida o lenta ya sea por algún factor natural o provocado por actividades humanas. Los deslizamientos pueden acarrear consecuencias graves en el sector de falla como deterioro de la carretera o pérdidas humanas.

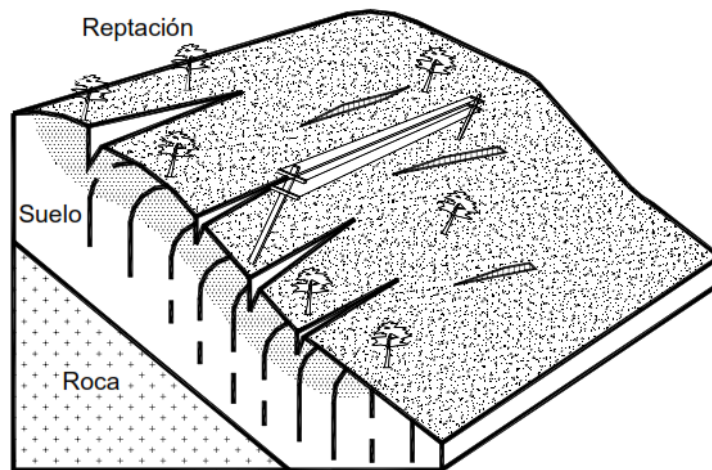
Los tipos de fallas más comunes que se presenta en taludes son:

- Deslizamiento superficial (Reptación “CREEP”).
- Movimiento del cuerpo del talud.
- Flujos.

2.5.1. Deslizamiento superficial (reptación creep).

El deslizamiento reptacional, también conocido como creep, es un tipo de movimiento lento y constante del suelo superficial y sub-superficial en una pendiente. Este desplazamiento ocurre de forma muy gradual. El creep se produce debido a los cambios entre ciclos húmedos y secos del suelo.

Figura 2.2 Esquema de un proceso de reptación

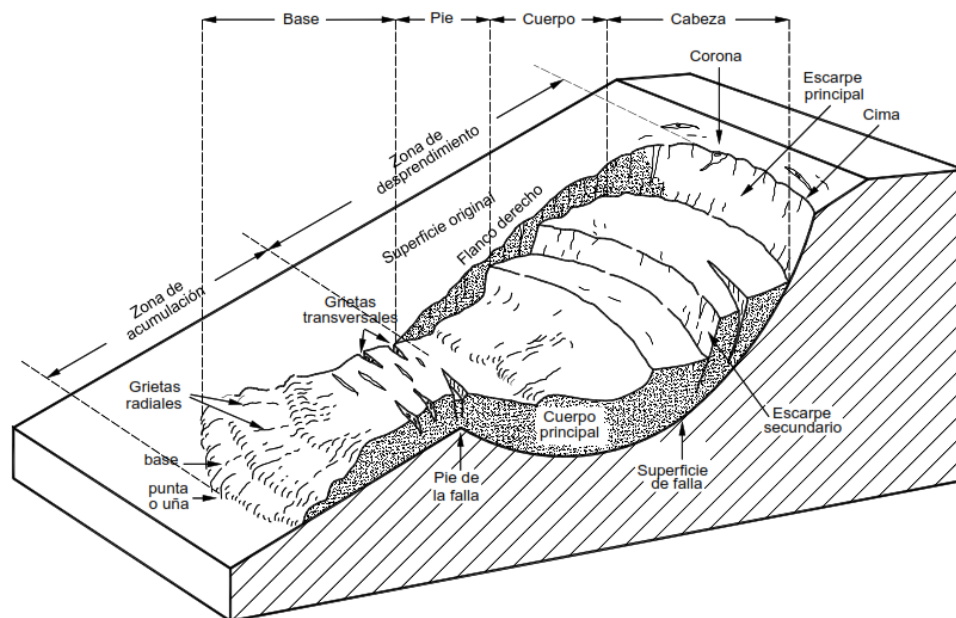


Fuente: Análisis geotécnico (Suárez, 2009)

2.6. PARTES DE UN DESLIZAMIENTO.

Para (Suárez, 2009, p. 5-6). En un deslizamiento típico o desplazamiento en masa. Las partes principales son las siguientes:

Figura 2.3 Partes de un deslizamiento



Fuente: Análisis geotécnico (Suárez, 2009)

- **Cabeza.**

Parte superior de la masa de material que se mueve. La cabeza del deslizamiento no corresponde necesariamente a la cabeza del talud. Arriba de la cabeza está la corona.

- **Cima.**

El punto más alto de la cabeza, en el contacto entre el material perturbado y el escarpe principal.

- **Corona.**

El material que se encuentra en el sitio, (prácticamente inalterado), adyacente a la parte más alta del escarpe principal, por encima de la cabeza.

- **Escarpe principal.**

Superficie muy inclinada a lo largo de la periferia posterior del área en movimiento, causado por el desplazamiento del material. La continuación de la superficie del escarpe dentro del material conforma la superficie de la falla.

- **Escarpe secundario.**

Superficie muy inclinada producida por el desplazamiento diferencial dentro de la masa que se mueve. En un deslizamiento pueden formarse varios escarpes secundarios.

- **Superficie de falla.**

Área por debajo del movimiento y que delimita el volumen del material desplazado. El suelo por debajo de la superficie de la falla no se mueve, mientras que el que se encuentra por encima de ésta, se desplaza. En algunos movimientos no hay superficie de falla.

- **Pie de la superficie de falla.**

La línea de interceptación (algunas veces tapada) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del terreno.

- **Base.**

El área cubierta por el material perturbado abajo del pie de la superficie de falla.

- **Punta o uña.**

El punto de la base que se encuentra a más distancia de la cima.

- **Cuerpo principal del deslizamiento.**

El material desplazado que se encuentra por encima de la superficie de falla. Se pueden presentar varios cuerpos en movimiento.

- **Superficie original del terreno.**

La superficie que existía antes de que se presentara el movimiento.

- **Costado o flanco.**

Un lado (perfil lateral) del movimiento. Se debe diferenciar el flanco derecho y el izquierdo.

2.7. FACTORES QUE INFLUENCIAN EN LA ESTABILIDAD DE TALUDES.

Los factores o parámetros básicos que afectan la estabilidad de un talud o ladera en la presente evaluación son los siguientes:

Desde la posición de (Suárez, , 1998, p. 35-38).

2.7.1. Factores geométricos.

La conformación topográfica del talud: altura, pendiente, curvatura, largo y ancho, actuando en forma conjunta o separada, afectan la estabilidad de un talud, por cuanto determinan los niveles de esfuerzos totales y las fuerzas de gravedad que provocan los movimientos.

Entre los parámetros topográficos a estudiar se pueden extraer los siguientes:

- **Pendiente.**

Es la medida de la inclinación del talud. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m/1$, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical.

- **Curvatura.**

Se define como concavidad o convexidad ya sea tanto en sentido longitudinal como transversal y afecta el equilibrio de la masa en sí.

- **Largo – ancho.**

Entre más largo sea un talud, mayor recorrido tendrán las aguas de escorrentía sobre éste y por lo tanto el talud estará más expuesto a la erosión superficial.

- **Área de infiltración arriba del talud.**

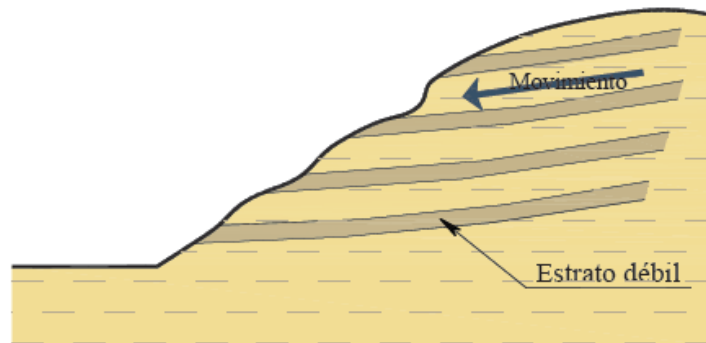
Es importante identificar áreas de concentración de agua arriba del talud, que coinciden con depresiones topográficas o zonas de regadío intenso. Entre más grande sea la zona que aporte agua al talud, será mayor la cantidad de agua que está afectando la estabilidad del talud.

2.7.2. Factores geológicos.

La Geología generalmente, define las características o propiedades del suelo o roca. La formación geológica determina la presencia de materiales duros o de baja resistencia y las discontinuidades pueden facilitar la ocurrencia de movimientos a lo largo de ciertos planos de debilidad.

Los elementos geológicos principales a estudiar son los siguientes:

Figura 2.4 Aspectos geológicos



Fuente: Soil mechanics and foundation (Budhu, 2007)

- **Formación Geológica.**

(Das, 2015) Los materiales de origen ígneo-metamórfico poseen un comportamiento diferente a los suelos de origen sedimentario, aluviones, coluviones, etc.

- **Estructura y discontinuidades.**

En los suelos residuales y rocas la estratificación y las discontinuidades actúan como planos de debilidad o como conductores de corrientes de agua subterránea y las características de estas pueden facilitar los movimientos.

- **Meteorización.**

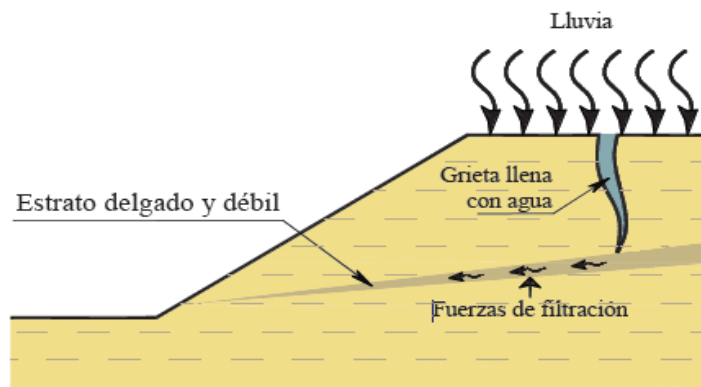
La descomposición física o química produce alteraciones en la roca o suelo, las cuales modifican substancialmente los parámetros de resistencia y permeabilidad, facilitando la ocurrencia de deslizamientos.

2.7.3. Factores hidrológicos e hidrogeológicos.

Los cambios en el régimen de aguas subterráneas actúan como detonadores de movimientos en las laderas o taludes y estos se encuentran generalmente, relacionados con las lluvias y la hidrología superficial.

En un estudio de deslizamientos se deben tener en cuenta los parámetros relacionados con la hidrogeología y en especial los siguientes factores:

Figura 2.5 Talud sometido a lluvia



Fuente: Soil mechanics and foundation (Budhu, 2007)

- **Características de las lluvias.**

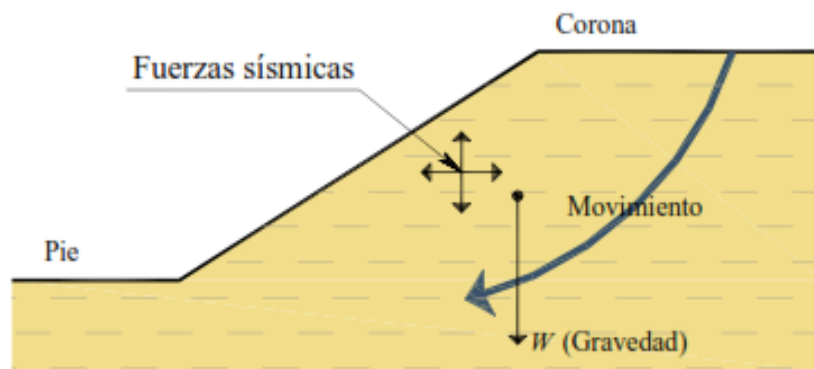
La ocurrencia de períodos lluviosos intensos produce ascensos en los niveles piezométricos y la saturación disminuye las tensiones capilares.

- **Régimen de aguas subterráneas.**

Los niveles de agua freáticas pueden fluctuar de manera considerable con el tiempo y modificar la resistencia de los materiales y el estado de esfuerzos. Es importante determinar las áreas de recarga y descarga, partiendo de la base del conocimiento del clima regional y análisis del terreno, incluyendo el tipo y distribución de la roca, fallas, fracturas, manantiales y humedales.

2.7.4. Factores geotécnicos.

Figura 2.6 Fuerzas debidas a la gravedad y fuerza provocadas por sismos



Fuente: Soil mechanis and foundation (Budhu, 2007)

- **Resistencia al Cortante.**

La resistencia al corte representa la modelación física del fenómeno de deslizamiento. Los parámetros de ángulo de fricción y cohesión determinan el factor de seguridad al deslizamiento de una determinada superficie dentro del terreno. Los ángulos de fricción varían de cero en materiales muy blandos, a 50 grados en gravas angulosas o mantos de arenisca y las cohesiones de cero en materiales granulares limpios, a más de 10 Kg/cm² en suelos muy bien cementados y valores superiores en las rocas masivas.

- **Permeabilidad.**

La permeabilidad mide la resistencia interna de los materiales al flujo del agua y puede definir el régimen de agua subterránea, concentración de corrientes, etc. Los valores del

coeficiente de permeabilidad varían de 100 cm/seg., en roca fracturada o suelos compuestos por arenas y gravas, hasta 10 -10 cm/seg., en arcillas impermeables o en pizarras y granitos sanos.

- **Sensitividad.**

La sensitividad se define como la relación de la resistencia pico al corte entre una muestra inalterada y otra remoldeada. En algunos suelos arcillosos esta relación puede ser hasta de 4, lo que equivale a que se pierde gran parte de la resistencia al remoldearse; y en la literatura se conoce de casos catastróficos, donde por acción del cambio de esfuerzos, el suelo se remoldea in situ, pierde su resistencia y se produce el deslizamiento.

- **Expansividad.**

Los suelos arcillosos al contacto con el agua expanden su volumen produciéndose movimientos de extensión dentro de la masa del suelo. En suelos sensitivos se puede producir pérdida de resistencia al corte por acción del remoldeo generado por el proceso expansivo, factor que se ha detectado en suelos de origen volcánico en el suroccidente de Colombia. La expansividad de un suelo se puede medir por medio de ensayos de presión de expansión o expansión libre o por su relación con los límites de plasticidad. La expansividad de suelos arcillosos en los rellenos de juntas puede generar deslizamientos de rocas.

- **Erosionabilidad.**

La erosionabilidad es la facilidad con la cual el suelo puede ser desprendido y transportado por acción del agua. Este factor puede afectar la estabilidad de un talud, en cuanto produce cambios topográficos desestabilizantes o genera conductos internos de erosión.

La combinación de los factores citados puede determinar la condición de rotura a lo largo de unas varias superficies, y que sea cinéticamente posible el movimiento de un cierto volumen de masa suelo o roca.

2.8. FACTOR DE SEGURIDAD.

El factor de seguridad de taludes es una medida para evaluar la estabilidad de terraplenes y taludes. Muestra la relación entre las fuerzas que tienden a desestabilizar un talud y las fuerzas que lo mantienen estable. Un factor de seguridad mayor que 1 significa que la pendiente es estable, mientras que un factor de seguridad menor que 1 significa que la pendiente es inestable y pueden ocurrir deslizamientos de tierra y colapsos.

El valor del factor de seguridad puede variar dependiendo de varios factores, como las características del suelo, la geometría del talud y las condiciones climáticas. En general, se busca obtener un factor de seguridad lo más cercano posible a 1.5 o superior para garantizar la estabilidad del talud.

Es importante recordar que la magnitud del factor de seguridad puede variar según la situación.

- Pendientes grandes e inestables se puede optar en reducir el parámetro del factor de seguridad de 1.15 o 1.20.
- Pendientes pequeñas, deslizamientos de tierra puede ser necesario un factor de seguridad de 1.5.

Para (Das, 2015, p. 335-336). El factor de seguridad se define como:

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d} \quad (1)$$

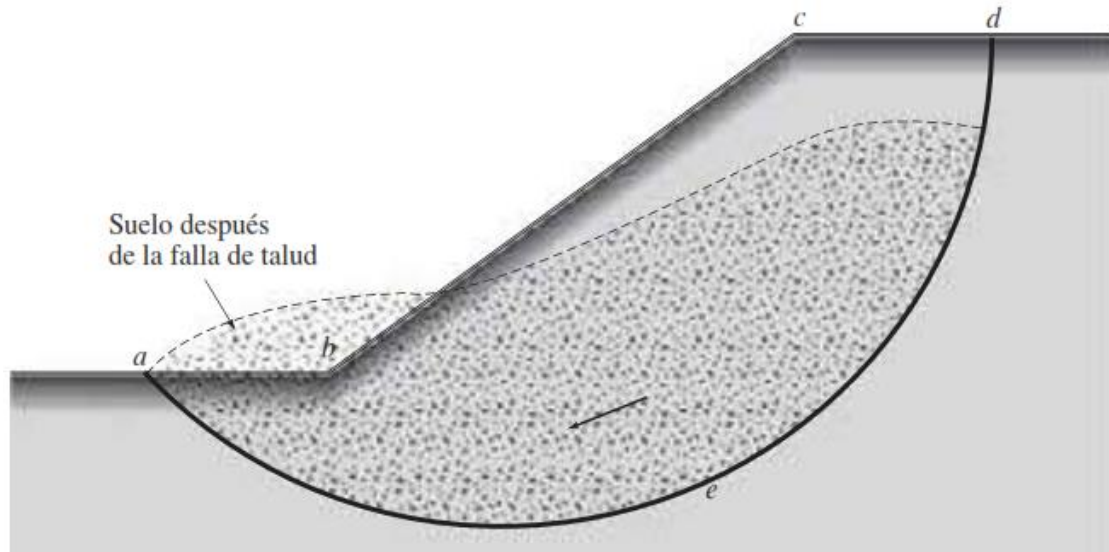
Donde:

FS_s = factor de seguridad con respecto a la resistencia.

τ_f = resistencia media del suelo al corte.

τ_d = esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de la falla.

Figura 2.7 Falla de talud



Fundamentos de ingeniería geotécnica (Das, 2015)

La resistencia al corte de un suelo consiste de dos componentes, la cohesión y la fricción, y se puede expresar como:

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2)$$

Donde:

c' = cohesión.

ϕ' = ángulo de fricción de drenado.

σ' = esfuerzo normal efectivo en la superficie potencial de falla.

De manera similar, también podemos escribir.

$$\tau_d = c'_d + \sigma' \tan \phi'_d \quad (3)$$

Donde c'_d y ϕ'_d son, respectivamente, la cohesión eficaz y el ángulo de fricción que se desarrollan a lo largo de la superficie potencial de falla. Sustituyendo las ecuaciones (2) y (3) en la ecuación (1), obtenemos.

$$FS_s = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{c'_d + \sigma' \tan \phi'_d} \quad (4)$$

Ahora podemos introducir algunos otros aspectos del factor de seguridad, es decir, el factor de seguridad con respecto a la cohesión, FS_c y el factor de seguridad con respecto a la fricción, $FS_{\phi'}$. Esto se define como sigue:

$$FS_{c'} = \frac{c'}{c'_d} \quad (5)$$

Y

$$FS_{\phi'} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_d} \quad (6)$$

Cuando se comparan las ecuaciones (4), (5) y (6), vemos que cuando $FS_{c'}$ llega a ser igual a $FS_{\phi'}$ que es el factor de seguridad con respecto a la resistencia. O, si

$$\frac{c'}{c'_d} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_d}$$

podemos escribir

$$FS_s = FS_{c'} = FS_{\phi'} \quad (7)$$

Cuando FS_s es igual a 1, el talud está en un estado de fallo inminente. En general, un valor de 1.5 para el factor de seguridad con respecto a la resistencia es aceptable para el diseño de un talud estable.

2.8.1. Angulo de fricción.

Para (Suárez, 2009, p. 76) el ángulo de fricción es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física:

$$\text{Coeficiente del Angulo} = \tan \phi$$

El ángulo de fricción (ϕ) depende de una gran cantidad de factores, algunos de los más importantes son:

- Tamaño de los granos o partículas.
- Forma de los granos o partículas.
- Distribución de los tamaños de granos o partículas.
- Densidad.

Tabla 2.1 Ángulo de fricción interna de algunos suelos

Tipo de suelo	Ángulo de fricción interna grados (°)
Arena con granos redondeados suelta	27 - 30
Arena con granos redondeados media	30 - 35
Arena con granos redondeados densa	35 - 38
Arena con granos angulares suelta	30 - 35
Arena con granos angulares media	35 - 40
Arena con granos angulares densa	40 - 45
Grava con algo de arena	34 - 48
Arcillas consolidadas	20 - 30
Arcillas arenosas	16 - 20
Limos	26 - 35

Fundamentos de ingeniería geotécnica (Das, 2015)

2.8.2. Cohesión.

Para (Suárez, 2009, p. 77) la cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en la mecánica de suelos, es utilizada para representar

la resistencia al cortante producida por la cementación entre las partículas, mientras que, en la física, este término se utiliza para representar la resistencia a la tensión.

En los suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a cero y a estos suelos se les denomina suelos friccionantes o “no cohesivos” ($c = 0$).

Tabla 2.2 Cohesión de suelos

Tipo de suelo	Cohesión Kg/cm ²
Gravas	-
Arenas	-
Arcillas	0,05 - 0,10
Arcilla blanda	0,25 - 0,50
Arcilla mediana	0,60 - 0,80
Arcilla firme	0,80 - 1,00
Arcilla muy firme	1,00 - 1,20
Arcilla dura y compacta	0,40 - 0,60
Arcilla arenosa densa	0,10
Limo	0,10 - 0,30

Fuente: Suelos, fundaciones y muros (Fratelli, 1993)

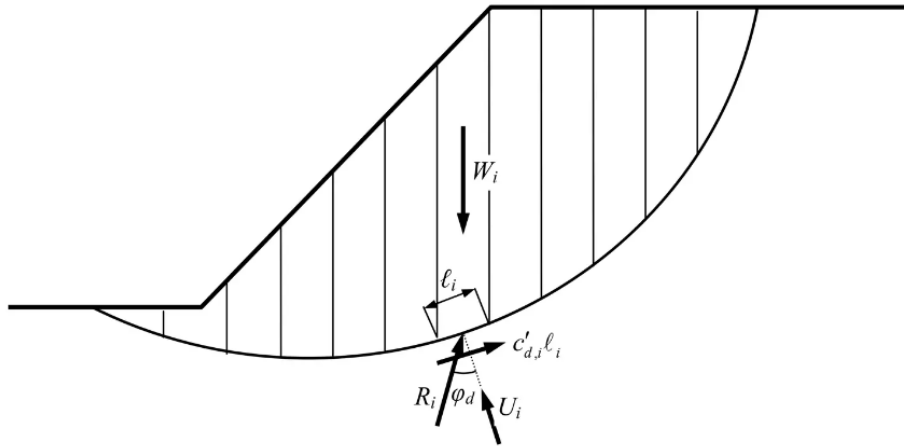
2.8.3. Factor de seguridad método de dovelas.

El factor de seguridad por el método de dovelas es una medida utilizada para evaluar la estabilidad de un talud o pendiente utilizando el enfoque de las dovelas o rebanadas. Este método asume superficies de falla circulares y divide el área de falla en tajadas verticales. Luego, se obtienen las fuerzas actuantes y resultantes para cada tajada y se realiza la sumatoria de estas fuerzas para obtener el factor de seguridad.

Para (Alonso, 2005, p. 41). Con objeto de mejorar la precisión de los métodos de equilibrio global se desarrollaron los métodos de las rebanadas dovelas. En ellos la masa en deslizamiento se divide, a efectos de cálculo, en una serie de rebanadas verticales, que se consideran como sólidos rígidos o bloques y que por tanto deben satisfacer, cada uno, todas las condiciones de equilibrio.

No menos de 10-15 rebanadas se suelen utilizar en la práctica.

Figura 2.8 División de un deslizamiento en rebanadas método de equilibrio límite



Fuente: Estabilidad de taludes (Alonso, 2005)

2.9. MÉTODO PARA ESTABILIZACIÓN DE TALUDES.

El objetivo principal de un estudio de estabilidad de taludes o laderas es el de establecer medidas de prevención y control para reducir los niveles de amenaza y riesgo. Generalmente, los beneficios más importantes desde el punto de vista de reducción de amenazas y riesgos es la prevención.

Una vez caracterizado el suelo de los taludes se tienen distintos métodos para estabilizarlo, sin embargo, no todos estos métodos son apropiados para este proyecto.

Dentro del estudio de inestabilidad en taludes, existen varios métodos para estabilizar un talud, como ser:

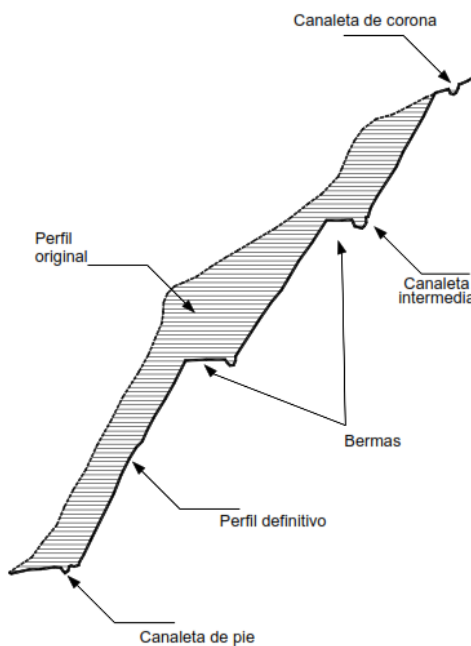
- Aumentar la resistencia del suelo.
- Disminuir los esfuerzos actuantes en el talud.
- Aumentar esfuerzos de confinamiento del talud.
- Modificación de la geometría del talud.
- Geomalla reforzada.

2.9.1. Modificación de la geometría del talud.

La estabilización de taludes mediante cambios geométricos implica realizar modificaciones en la forma o inclinación del talud para aumentar su estabilidad. Algunas de las medidas o métodos utilizados para lograr este cambio geométrico son:

- Disminución de la inclinación del talud: Reducir el ángulo de inclinación del talud puede aumentar su estabilidad al disminuir las fuerzas desestabilizadoras.
- Eliminación del peso en la cabecera del talud: Esta medida implica eliminar parte del material o peso en la parte superior del talud, lo que puede ayudar a reducir las fuerzas que actúan sobre el talud y mejorar su estabilidad.
- Incremento del peso en el pie del talud: Agregar peso o reforzar la base del talud puede aumentar su estabilidad al proporcionar una mayor resistencia al corte en la parte inferior.
- Construcción de bancos (terrazas) y bermas: Esta medida implica crear escalones o plataformas en el talud, lo que puede ayudar a reducir la longitud de las superficies de falla potenciales y mejorar la estabilidad.

Figura 2.9 Estabilización por conformación del taludes y bermas.



Fuente: Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales (Suárez, 1998)

Para (Suárez, 1998, p. 278-279). El terraceo se puede realizar con el propósito de controlar la erosión y facilitar el establecimiento de la vegetación o para aumentar el factor de seguridad.

La altura de las gradas es generalmente de 5 a 7 metros y cada grada debe tener una cuneta revestida para el control del agua superficial.

El sistema de bermas es una forma de terraceo. Se construyen bermas intermedias en los sitios de cambio de pendiente y en los sitios donde se requiera para garantizar un factor de seguridad adecuado contra deslizamiento. La localización y ancho de las bermas depende del propósito de las bermas.

El objetivo de las bermas puede ser:

- El manejo de aguas de escorrentía y control de erosión. Estas bermas generalmente tienen un ancho 1 a 2 metros y se colocan a diferentes alturas que varían entre 5 y 7 metros, dependiendo de la calidad de los suelos y coincidiendo con sitios de cambio de pendiente del talud. En suelos erosionables la berma debe tener una pendiente de 5 a 10% hacia adentro del talud y se debe construir una cuneta revestida en su parte interior para el control y manejo de las aguas de escorrentía. La pendiente longitudinal de la berma debe ser superior al 3% para garantizar la salida eficiente y rápida del agua recolectada.
- Aumentar el factor de seguridad contra deslizamiento. En ocasiones, se requiere la construcción de bermas de gran ancho en suelos cohesivos para aumentar los factores de seguridad al deslizamiento. En suelos granulares (arenosos o gravosos) se debe preferir disminuir la pendiente del talud o construir bermas que pueden ser inestables por la pendiente del talud entre ellas.

Al construir las terrazas el talud puede quedar dividido en varios taludes de comportamiento independiente, los cuales a su vez deben ser estables. Como criterio general las gradas inferiores pueden tener mayor pendiente y ésta debe disminuir hacia la parte superior del talud donde el suelo residual es menos competente.

2.9.2. Proceso constructivo de modificación geométrica del talud.

El proceso constructivo de la modificación geométrica y terraceo en taludes implica varios pasos clave para mejorar la estabilidad y prevenir deslizamientos.

- **Evaluación Inicial:** Se realiza un estudio geotécnico para identificar las condiciones del talud y determinar su factor de seguridad.
- **Diseño del Proyecto:** Se diseña la nueva geometría del talud, incluyendo la pendiente y el terraceo. Se consideran factores como la cantidad de suelo a mover, la pendiente deseada y las condiciones climáticas.
- **Preparación del Terreno:** Se limpia y prepara el área del talud, eliminando vegetación y otros obstáculos.
- **Excavación y Movimiento de Suelo:** Se excava el suelo de la parte superior del talud y se traslada a las áreas necesarias para crear terrazas.
- **Construcción de Terrazas:** Se construyen terrazas escalonadas para reducir la pendiente y mejorar el drenaje. Esto puede incluir la instalación de muros de contención y sistemas de drenaje.
- **Revegetación:** Se planta vegetación adecuada para estabilizar el suelo y prevenir la erosión.
- **Mantenimiento:** Se realiza un monitoreo continuo y se llevan a cabo labores de mantenimiento para asegurar la estabilidad a largo plazo.

Este proceso ayuda a mejorar la estabilidad del talud, reducir el riesgo de deslizamientos y proteger la infraestructura y las vidas humanas.

2.9.3. Geomalla reforzada.

Para este método de estabilización se optó por la utilización de una geomalla reforzada de la empresa **Maccaferri**.

MacMat R1 de Maccaferri es un geotextil. Se trata de un geomat fabricado con filamentos de poliamida que se utiliza principalmente para la estabilización de taludes y el control de la erosión. Este producto está diseñado para ser asegurado a las superficies vulnerables de

los taludes, ayudando a prevenir la erosión superficial causada por el escurrimiento del agua. El MacMat R1 es una matriz tridimensional de fibras sintéticas no degradables, estabilizadas contra los rayos UV, lo que le confiere durabilidad y efectividad en aplicaciones a largo plazo. Algunas de las características de este material son:

- Proteger la superficie contra la erosión causada por la lluvia y el viento.
- Evitar el transporte de partículas de suelo de la superficie protegida.
- Prevenir la formación de grietas en los taludes.
- Permitir el crecimiento de vegetación entre sus filamentos.

Tabla 2.3 Factores típicos en geomalla reforzada MacMat R1

Geomalla reforzada MacMat R1			
Diámetro	mm	2,7	
Cuadrícula del rombo	cm	8x10	
Resistencia tracción	KN/m	50	
Costo económico Bs./m ²	Bs./m ²	88,78	
Ancho	m	2	
Largo	m	25	

Fuente: Maccaferri

2.9.4. Proceso constructivo implementación de geomalla reforzada.

El proceso constructivo de colocación de geomalla reforzada en taludes después de un terrazo incluye varios pasos clave para asegurar la estabilidad y prevenir la erosión.

- **Preparación del terreno:** Antes de colocar la geomalla, es necesario limpiar la zona de escombros y garantizar una base estable y bien compactada. Esto incluye nivelar desniveles y rellenar agujeros.
- **Excavación de zanjas:** En la parte superior del talud, se debe excavar una zanja para el anclaje de las láminas de geomalla. La zanja debe tener aproximadamente 20 centímetros de ancho y profundidad.
- **Colocación de la geomalla:** Las láminas de geomalla se extienden desde la parte superior del talud, asegurándose de que cubren toda la zona que necesita

estabilización. Si el largo de la lámina no es suficiente para llegar a la base, la geomalla superior debe solaparse con la siguiente.

- **Fijación de la geomalla:** La geomalla se fija con grapas o piquetas de sujeción para asegurar su posición. Es importante que la geomalla esté bien anclada para evitar desplazamientos.
- **Relleno y compactación:** Una vez colocada y fijada la geomalla, se procede a rellenar la zanja y compactar el suelo para asegurar una buena interacción entre el suelo y la geomalla.
- **Monitoreo y mantenimiento:** Después de la instalación, es crucial monitorear el talud para asegurar que no haya movimientos inesperados y realizar el mantenimiento necesario para mantener la estabilidad a largo plazo.

Este proceso ayuda a mejorar la estabilidad del talud, prevenir la erosión y garantizar la seguridad de la estructura.

2.10. DETERMINACIÓN DEL F.S. A PARTIR DEL SOFTWARE (SLIDE 6.0).

El software Slide 6.0 es una herramienta de análisis geotécnico ampliamente utilizada para evaluar la estabilidad de taludes y laderas. El análisis de estabilidad se puede realizar utilizando varios métodos, incluido el método de las dovelas.

El software Slide 6.0 permite modelar y analizar la estabilidad de pendientes bajo una variedad de condiciones, teniendo en cuenta factores como la geometría de la pendiente, las propiedades del suelo y las cargas aplicadas.

Según (ICOG Ilustre Colegio Oficial de Geólogos, 2019). Slide es un software de análisis de Estabilidad de Taludes en 2D que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de la estabilidad. Su ámbito de aplicación en minería y obra civil es muy variado, permitiendo evaluar un gran número de problemáticas geotécnicas, tales como estabilidad de terraplenes, presas, taludes en excavaciones mineras o en edificaciones, efectos de cargas externas, sísmicas, eficiencia de elementos de refuerzo, etc.

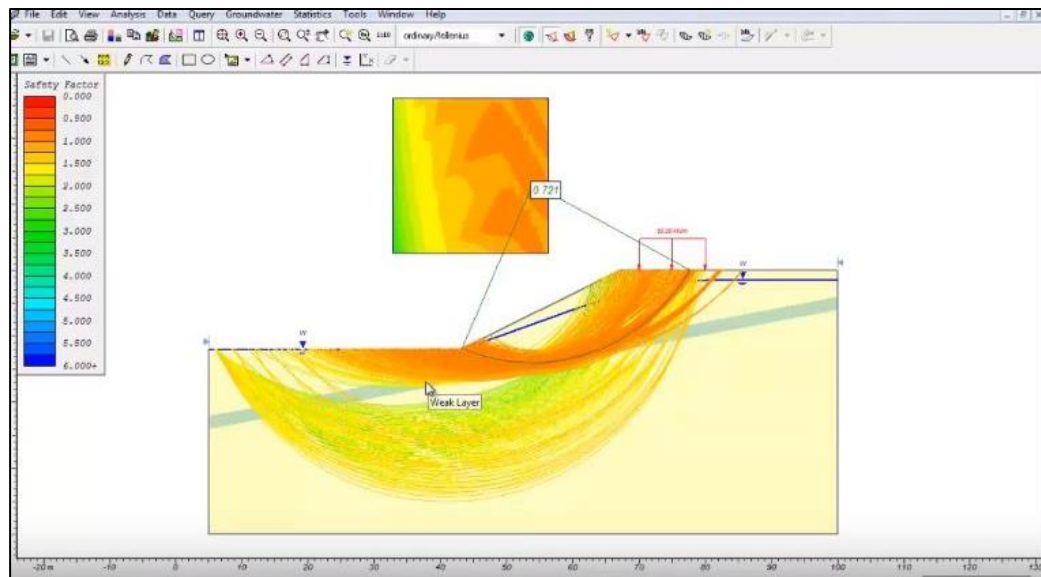
Slide es un software de análisis de Estabilidad de Taludes en 2D que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de la estabilidad.

Incluye análisis de agua subterránea por elementos finitos en estado estacionario e integra capacidades de análisis de sensibilidad, probabilísticos y análisis retrospectivos.

Su ámbito de aplicación en minería y obra civil es muy variado, permitiendo evaluar un gran número de problemáticas geotécnicas, tales como estabilidad de terraplenes, presas, taludes en excavaciones mineras o en edificaciones, efectos de cargas externas, sísmicas, eficiencia de elementos de refuerzo, etc.

Es un software potente y flexible desarrollado por ROCSCIENCE, empresa puntera a nivel mundial en modelización geotécnica.

Figura 2.10 Cálculo de estabilidad en 2D con el programa Slide 6.0



Fuente: <https://www.icog.es/TyT/index.php/2016/10/slide-la-mejor-aplicacion-estabilidad-taludes/>

El programa Slide ha ido creciendo de manera continua al mismo ritmo que se expandía la capacidad de análisis geotécnico por ordenador en los últimos años. Este continuo esfuerzo en investigación y actualización y la solvencia que proporciona su trayectoria, lo convierten en un software de referencia. Prueba de ello es el hecho de ser uno de los programas más reconocidos y utilizados que existen en el mercado.

Hoy en día existe una creciente variedad de software de modelización geotécnica a nivel general, y también en relación a la estabilidad de taludes. Sin embargo, no todos los

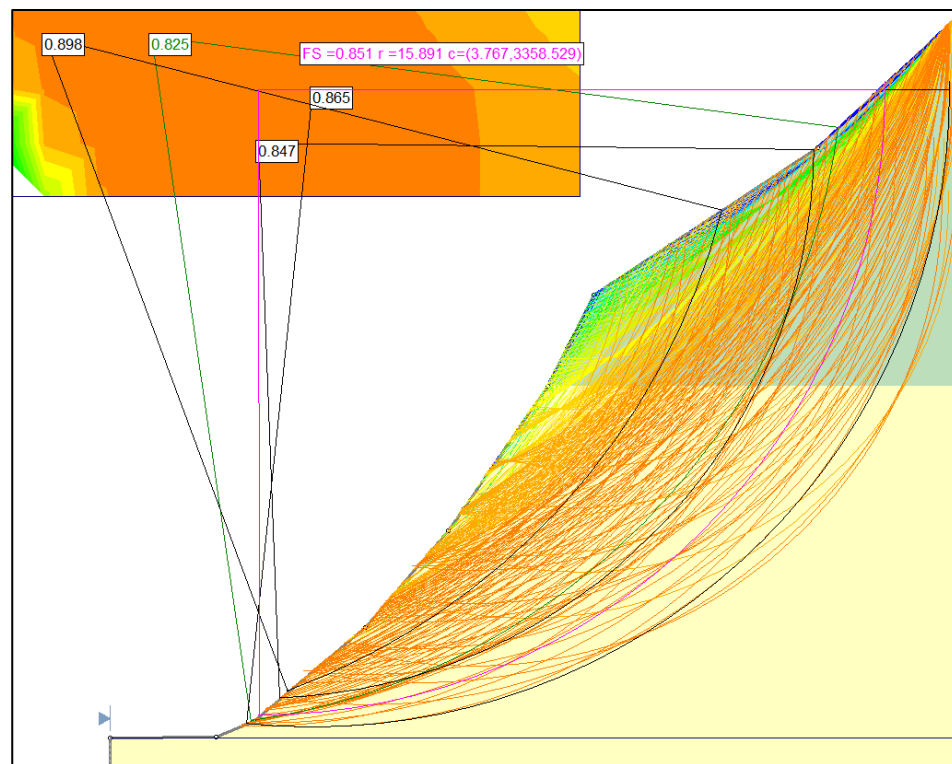
programas cuentan con la capacidad de cálculo y fiabilidad de Slide. Este programa destaca, además, entre otros programas del mercado, por una interfaz clara y sencilla y por un manejo muy intuitivo de las diversas capacidades que ofrecen los menús de análisis.

Con un coste de licencia muy competitivo en relación a otros competidores en el mercado de su misma capacidad y su amplia cobertura técnica de análisis, Slide se convierte en un software líder en el campo de la modelización geotécnica.

El programa Slide 6 analiza varios aspectos importantes para evaluar la estabilidad de taludes. Algunos de los aspectos más destacados incluyen:

Superficies de Falla: Slide permite definir diferentes tipos de superficies de falla, como circulares, elípticas, y superficies poligonales. Esto permite un análisis más preciso de las posibles fallas en el talud.

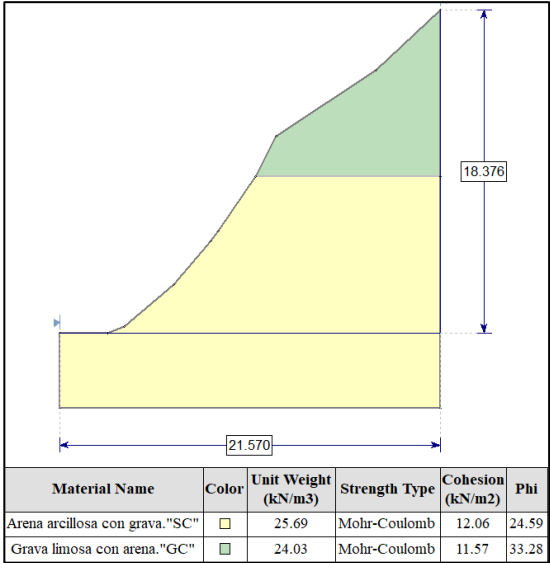
Figura 2.11 Superficies potenciales de falla



Fuente: Elaboración propia

Materiales y Propiedades del Suelo: Permite ingresar datos detallados sobre los materiales del talud, la cohesión, el ángulo de fricción interna, y la presión de poros.

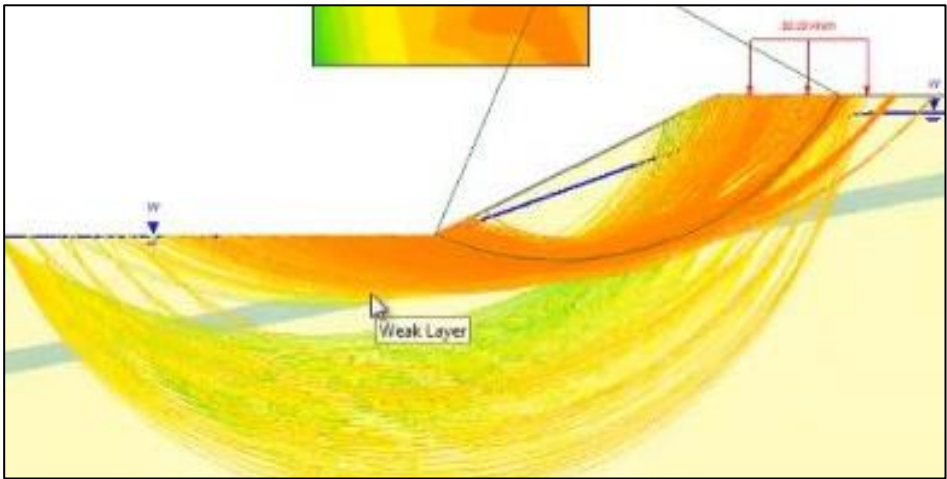
Figura 2.12 Materiales de un talud



Fuente: Elaboración propia

Cargas Externas: Slide permite modelar cargas externas, como cargas distribuidas uniformemente o cargas lineales concentradas. Esto es crucial para entender cómo las cargas adicionales pueden afectar la estabilidad del talud.

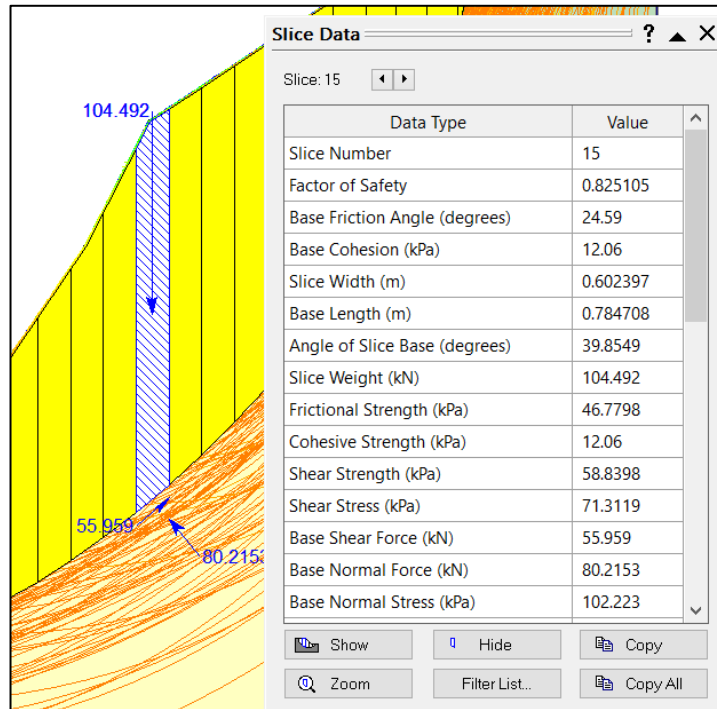
Figura 2.13 Cargas externas de un talud



Fuente: Elaboración propia

Simulación y Visualización: El programa genera gráficos y tablas detallados que muestran los resultados del análisis, permitiendo una fácil interpretación y comparación de los datos.

Figura 2.16 Propiedades de dovelas



Fuente: Elaboración propia

Estos aspectos permiten a los ingenieros realizar un análisis completo y preciso de la estabilidad de los taludes, ayudando a tomar decisiones informadas sobre la mitigación de riesgos y la implementación de medidas de seguridad

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRACTICA SOBRE LA ESTABILIDAD DE TALUDES TRAMO COCHAS – FALDA LA QUEÑUA

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRACTICA SOBRE LA ESTABILIDAD DE TALUDES TRAMO COCHAS – FALDA LA QUEÑUA.

La caracterización geométrica y geotécnica de un talud se refiere a la evaluación y descripción de sus propiedades físicas y geotécnicas. La geometría del talud incluye elementos como la altura y la pendiente. Estos elementos son fundamentales para comprender la forma y la estabilidad del talud. Por otro lado, la caracterización geotécnica de los taludes se refiere al proceso de evaluar y comprender las propiedades y comportamiento del suelo que conforman un talud. Esto implica determinar las propiedades físicas y mecánicas del suelo, como la cohesión, el ángulo de fricción interna y la resistencia al corte.

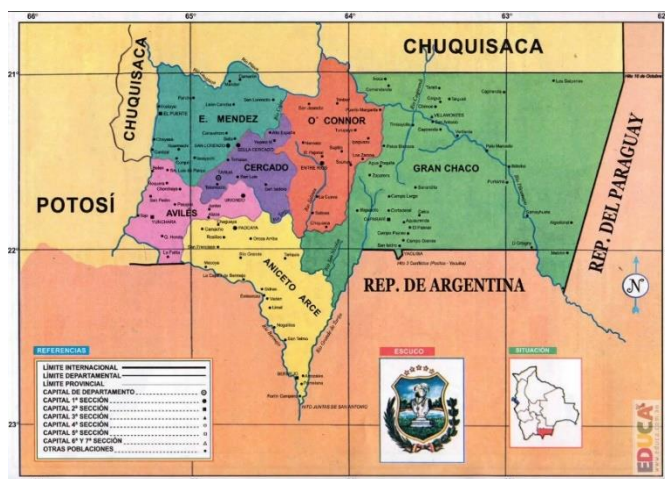
La caracterización de los taludes se dividió en 2 fases:

- Trabajo de campo.
- Trabajo de laboratorio y gabinete.

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA ZONA DE ESTUDIO.

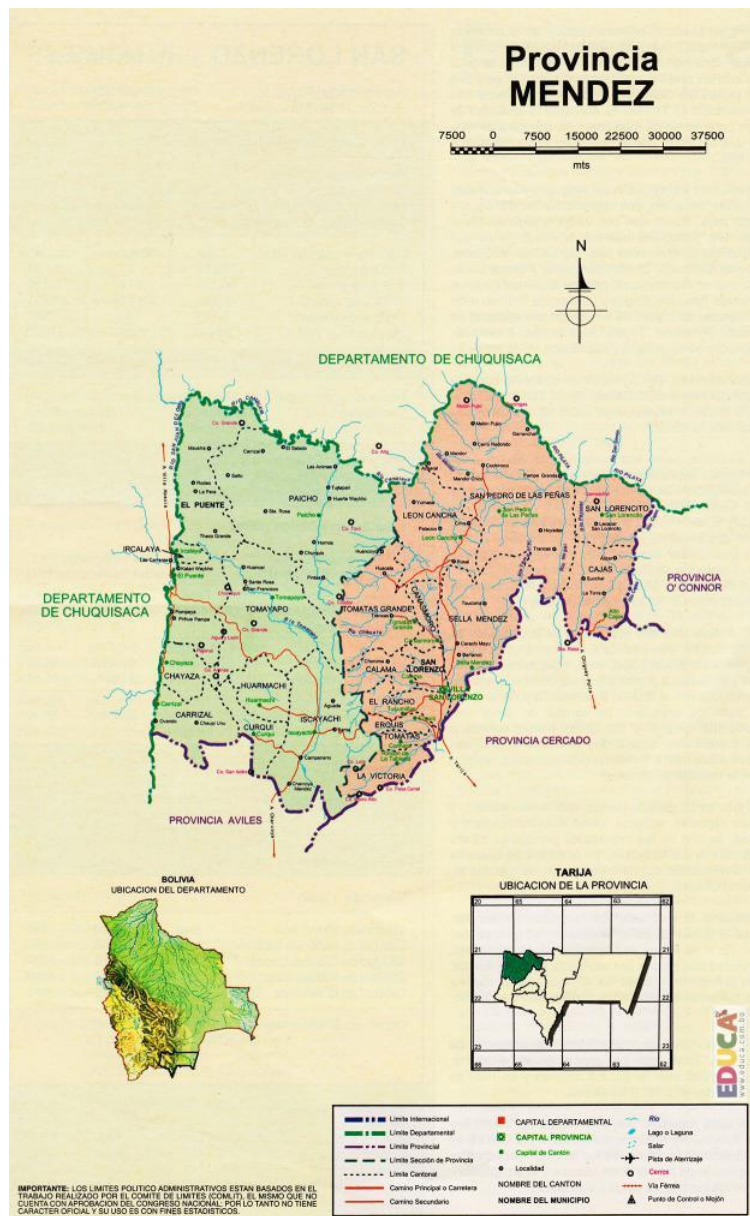
La zona de estudio está ubicada en la provincia Méndez municipio de San Lorenzo del departamento de Tarija, al sur de Bolivia.

Figura 3.1 Mapa político de departamento de Tarija



Fuente: <https://www.educa.com.bo/geografia/departamento-tarija>

Figura 3.2 Mapa de la provincia Méndez Tarija

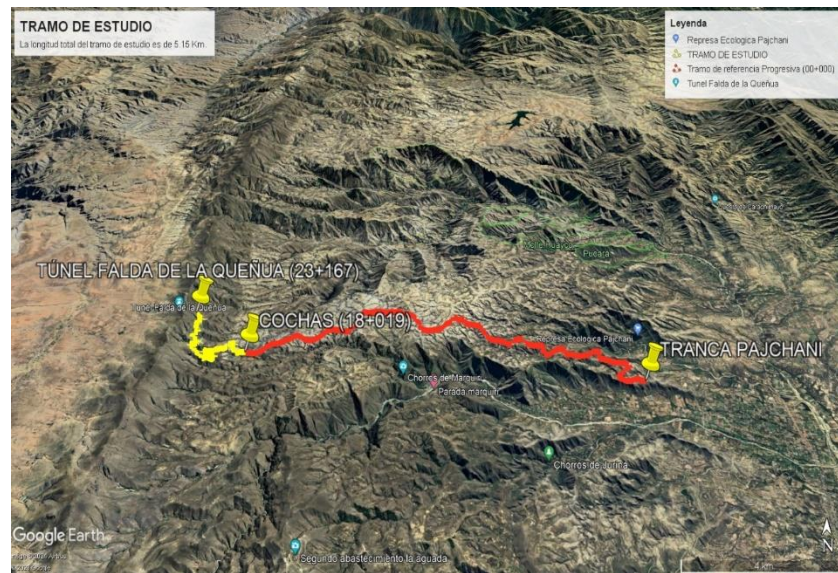


Fuente: <https://www.educa.com.bo/geografia/provincia-mendez>

Para la ubicación del tramo de estudio se tomó como punto de referencia la tranca de Pajchani como Progresiva km 0+000, y el tramo de estudio, se tomó desde la comunidad de Cochás (18+019) hasta el comienzo del túnel Falda La Queñua (23+167).

La distancia total del tramo de estudio es de 5.15 Km.

Figura 3.3 Tramo de estudio



Fuente: Elaboración propia (Google Earth)

Tabla 3.1 Coordenadas de tramo de estudio

Progresiva	Coordenadas geográficas	Coordenadas UTM
18+019 (Cochas)	21°23'49.33"S 64°54'11.16"O	302713.54 m E 7632666.25 m S
23+167 (Falda La Queñua)	21°23'10.05"S 64°55'9.36"O	301009.83 m E 7633825.40 m S

Fuente: Elaboración propia

3.2. CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

Se encuentra en la reserva biológica de la Cordillera de Sama, específicamente en el cerro El Condor.

Sector está identificado como una zona trasandina. Con presencia de humedad significativa durante los meses de noviembre a mayo, con lluvias, granizo y neblina.

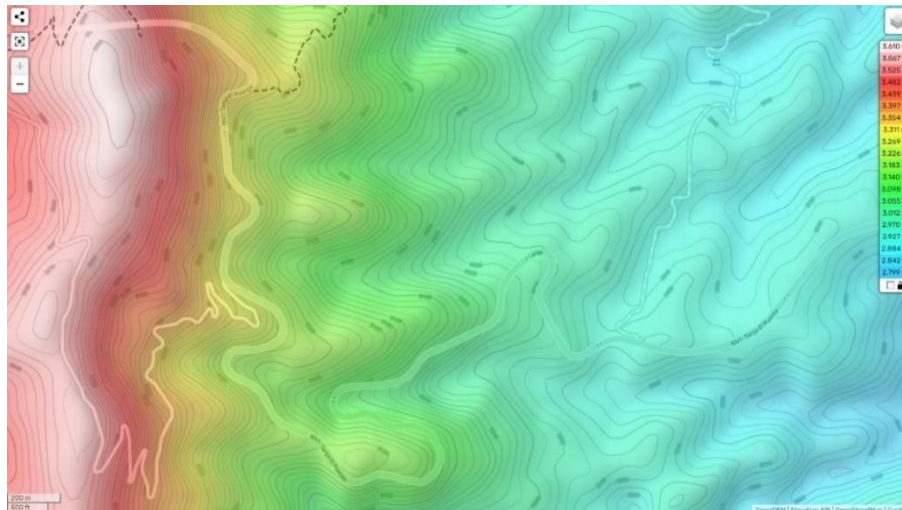
3.3. TRABAJO DE CAMPO.

El trabajo de campo estuvo centrado en identificar los taludes en riesgo y la recolección de suelo de 10 taludes y ejecución de 3 pozos de muestreo por cada talud, ubicados en sectores estratégicos.

3.3.1. Levantamiento topográfico.

El levantamiento topográfico se realizó en 10 taludes con riesgo, luego se determinó los parámetros básicos geométricos de los taludes, como la altura vertical (V), la longitud horizontal (H) y la pendiente del plano del talud.

Figura 3.4 Mapa topográfico zona de estudio



Fuente: <https://es-co.topographic-map.com/map-plkhdn/Bolivia/?center=-21.39453%2C-64.90981&zoom=16&base=6>

Para realizar el levantamiento se dispuso equipo topográfico como una estación total marca SOKKIA SET 5X, GPS Garmin y demás accesorios necesarios, los cuales son del gabinete de topografía de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Figura 3.5 a) "GPS" Instrumento geodésico b) Estación total SOKKIA SET 5X



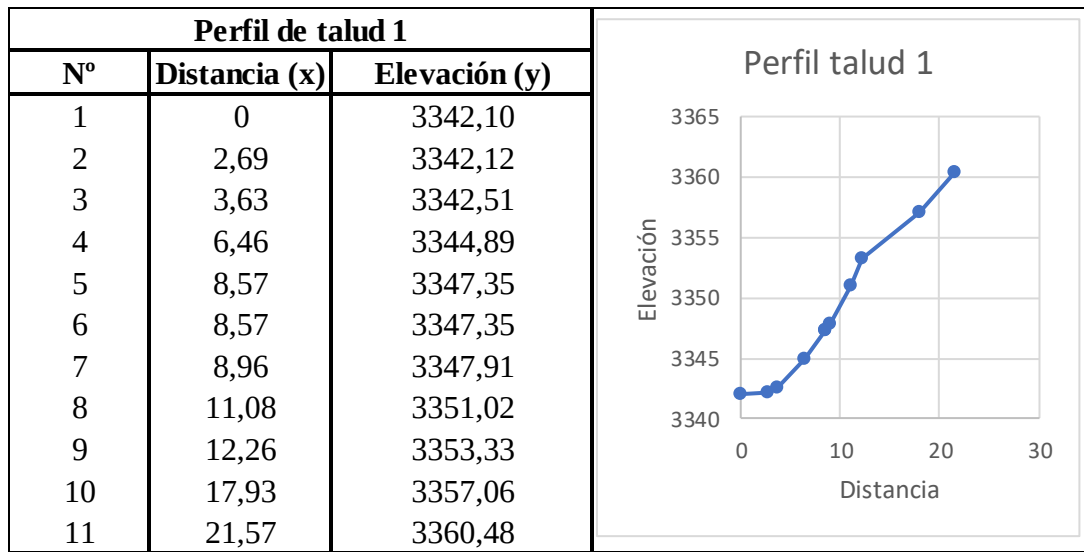
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.2 Coordenadas de los taludes

Descripción	Coordenadas geográficas	Coordenadas UTM
Talud 1	21°23'14.80"S 64°55'5.60"O	301132.99 m E 7633757.55 m S
Talud 2	21°23'26.11"S 64°55'6.18"O	301120.51 m E 7633409.38 m S
Talud 3	21°23'28.24"S 64°55'5.97"O	301127.42 m E 7633344.13 m S
Talud 4	21°23'32.43"S 64°55'4.16"O	301181.09 m E 7633215.81 m S
Talud 5	21°23'35.30"S 64°55'2.73"O	301223.36 m E 7633128.05 m S
Talud 6	21°23'43.68"S 64°55'5.44"O	301148.45 m E 7632869.35 m S
Talud 7	21°23'44.45"S 64°55'3.40"O	301207.50 m E 7632846.39 m S
Talud 8	21°23'49.21"S 64°54'58.74"O	301343.51 m E 7632701.63 m S
Talud 9	21°23'54.05"S 64°55'5.92"O	301138.52 m E 7632550.24 m S
Talud 10	21°23'55.48"S 64°55'3.99"O	301186.44 m E 7632517.19 m S

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.3 Perfil de talud 1



Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Recolección de muestras de suelo.

Se procedió a realizar la obtención de muestra representativa del suelo presente en los taludes para su posterior análisis, se extrajo suelo de pie, cuerpo y cabeza de cada talud.

La toma de muestra de suelo se realizó de forma manual excavando pozos de muestreo con la ayuda de herramientas como pico, pala y barreta. Se introdujo la muestra en sacos y en bolsas plásticas herméticas identificadas con el número de talud y punto de muestreo.

Figura 3.6 Recolección de muestra de suelos del talud a) Pie b) Cuerpo c) Cabeza



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.4 Coordenadas de pozos de muestreo

Coordenadas geográficas de pozos de muestreo			
talud 1	P1	21°23'14.90"S	64°55'6.40"O
	P2	21°23'15.03"S	64°55'6.47"O
	P3	21°23'15.20"S	64°55'6.50"O
talud 2	P1	21°23'26.40"S	64°55'6.30"O
	P2	21°23'27.20"S	64°55'6.70"O
	P3	21°23'26.75"S	64°55'7.55"O
talud 3	P1	21°23'28.6"S	64°55'06.1"O
	P2	21°23'28.71"S	64°55'6.40"O
	P3	21°23'28.61"S	64°55'6.97"O
talud 4	P1	21°23'32.7"S	64°55'03.9"O
	P2	21°23'32.78"S	64°55'4.17"O
	P3	21°23'32.72"S	64°55'4.44"O
talud 5	P1	21°23'35.79"S	64°55'3.49"O
	P2	21°23'35.1"S	64°55'02.8"O
	P3	21°23'34.76"S	64°55'3.20"O
talud 6	P1	21°23'43.4"S	64°55'5.84"O
	P2	21°23'43.98"S	64°55'5.33"O
	P3	21°23'44.13"S	64°55'4.85"O
talud 7	P1	21°23'44.81"S	64°55'3.46"O
	P2	21°23'44.92"S	64°55'3.56"O
	P3	21°23'45.10"S	64°55'3.44"O
talud 8	P1	21°23'48.04"S	64°54'59.39"O
	P2	21°23'48.23"S	64°54'59.12"O
	P3	21°23'48.04"S	64°54'59.39"O
talud 9	P1	21°23'54.00"S	64°55'6.40"O
	P2	21°23'54.44"S	64°55'6.25"O
	P3	21°23'54.28"S	64°55'6.79"O
talud 10	P1	21°23'55.40"S	64°55'4.18"O
	P2	21°23'55.70"S	64°55'4.02"O
	P3	21°23'55.57"S	64°55'4.74"O

Fuente: Elaboración propia

3.4. TRABAJO DE LABORATORIO Y GABINETE.

Los ensayos de laboratorio nos ayudan a determinar las propiedades geotécnicas de un sitio como parte de las técnicas de detección de la investigación.

Estos ensayos se realizan con muestras recolectadas previamente en el lugar de estudio y requieren una calidad de muestra diferente según el tipo de prueba.

Para la caracterización de materiales de los diez taludes de estudio, las muestras obtenidas fueron analizadas en el laboratorio de mecánica de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho para determinar las propiedades físico – mecánicas de las muestras tomadas de los taludes, los ensayos realizados son:

- Análisis granulométrico por tamizado (método de lavado) ASTM D-2487.
- Contenido de humedad ASTM D-2216.
- Límites de Atterberg ASTM D-4318.
- Clasificación de los suelos AASHTO. y S.U.C.S.
- Peso específico ASTM D-854.
- Corte directo ASTM D-3080.

3.4.1. Granulometría.

La granulometría se realizó por el método de lavado porque el agregado grueso presentaba adherencia de material fino adherido a él, es un proceso mediante el cual se separan las partículas de suelo en diferentes tamaños.

En el proceso de análisis granulométrico por lavado, se aplica agua para separar las partículas finas de la muestra, permitiendo así obtener datos precisos sobre la distribución de tamaños de partículas en el suelo.

Luego de la toma de muestras se cuarteó el material para obtener 5000 g. del material seco para luego lavarlo utilizando el tamiz N° 200, una vez obtenida la muestra limpia se depositó la muestra en el horno de secado durante 24 horas.

Figura 3.7 a) Cuarteo de suelo b) Lavado de suelo por tamiz N° 200



Fuente: Elaboración propia

El tamizado se realizó de manera manual, se utilizó tamices desde el N° 2½ hasta el tamiz N° 200. El material retenido en cada tamiz se anotó como dato para luego realizar la clasificación de suelos.

Figura 3.8 Serie de tamices



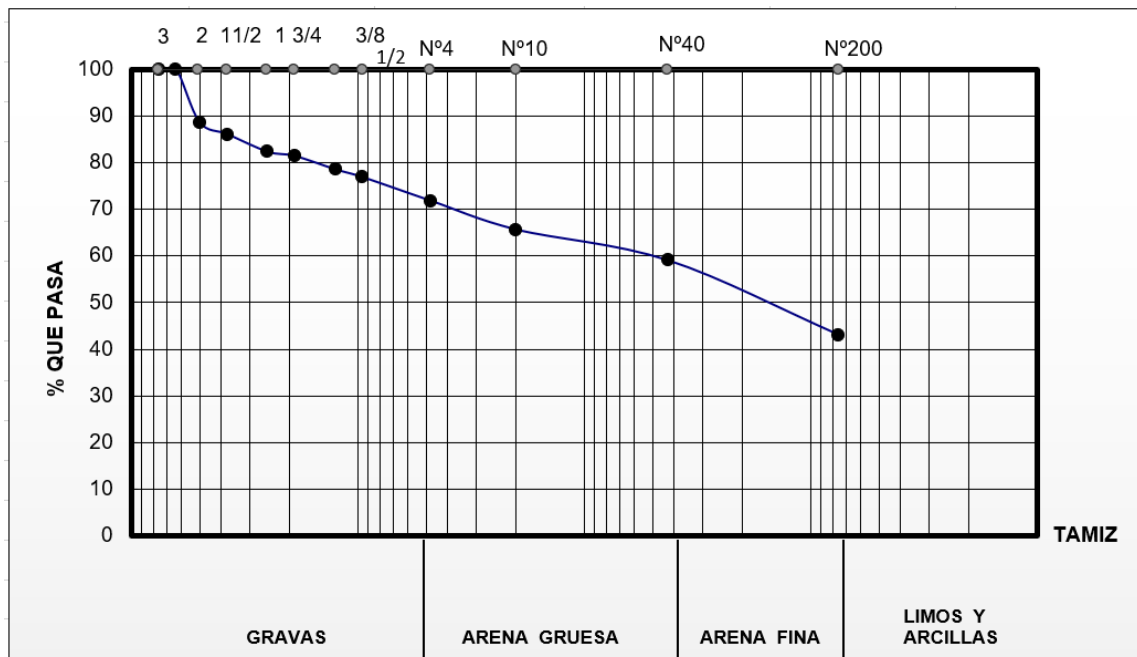
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.5 Granulometría Talud 1 P-1

Peso Total (g.)			5000	A.S.T.M.	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (g)	Ret. Acum (g)	% Ret	% Que Pasa del Total
3"	75,00	0,00	0,00	0,00	100,00
2 1/2"	63,50	0,00	0,00	0,00	100,00
2"	50,00	568,60	568,60	11,37	88,63
1 1/2"	37,50	131,30	699,90	14,00	86,00
1"	25,00	186,30	886,20	17,72	82,28
3/4"	19,00	44,80	931,00	18,62	81,38
1/2"	12,50	145,40	1076,40	21,53	78,47
3/8"	9,50	82,60	1159,00	23,18	76,82
Nº4	4,75	252,80	1411,80	28,24	71,76
Nº10	2,00	307,20	1719,00	34,38	65,62
Nº40	0,43	331,00	2050,00	41,00	59,00
Nº200	0,08	798,00	2848,00	56,96	43,04

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.9 Curva granulométrica Talud 1 P-1



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.6 Resultados de granulometría

Granulometría					
Talud	Pozo	% que pasa tamiz N° 4	% que pasa tamiz N° 10	% que pasa tamiz N° 40	% que pasa tamiz N° 200
Talud 1	Pozo 1	71,76	66,62	59,00	43,04
	Pozo 2	74,37	66,34	44,72	38,61
	Pozo 3	60,42	53,88	46,58	31,37
Talud 2	Pozo 1	53,11	39,00	29,61	18,26
	Pozo 2	51,98	36,59	25,50	14,40
	Pozo 3	59,11	45,29	36,01	25,73
Talud 3	Pozo 1	36,63	27,82	19,60	12,09
	Pozo 2	38,65	28,98	20,49	12,94
	Pozo 3	33,61	22,73	15,01	8,87
Talud 4	Pozo 1	42,00	34,20	26,75	12,46
	Pozo 2	67,94	62,25	56,81	27,54
	Pozo 3	63,48	53,51	44,20	24,41
Talud 5	Pozo 1	38,12	25,70	16,73	10,92
	Pozo 2	52,22	37,42	23,38	16,07
	Pozo 3	50,60	33,43	18,88	10,05
Talud 6	Pozo 1	80,92	59,10	33,41	20,85
	Pozo 2	45,25	35,69	27,70	21,26
	Pozo 3	37,13	18,62	9,42	5,89
Talud 7	Pozo 1	40,37	27,79	22,04	14,32
	Pozo 2	22,73	17,52	12,08	7,08
	Pozo 3	47,05	35,71	22,96	10,96
Talud 8	Pozo 1	33,70	20,37	12,28	5,18
	Pozo 2	78,61	58,21	35,72	18,18
	Pozo 3	44,90	30,90	21,80	13,75
Talud 9	Pozo 1	38,00	28,61	20,92	11,53
	Pozo 2	32,52	23,91	18,17	11,11
	Pozo 3	23,58	19,11	14,59	6,97
Talud 10	Pozo 1	27,27	17,42	11,61	5,36
	Pozo 2	28,07	19,81	14,15	8,04
	Pozo 3	49,32	34,39	20,93	12,55

Fuente: Elaboración propia

3.4.2. Contenido de humedad.

Para la determinación del contenido de humedad se realizó con la termobalanza KERN DAB en laboratorio. Se extrajo una muestra de suelo en una bolsa hermética para evitar la pérdida de humedad de la muestra, se pesó 20 g. para el ensayo. El método consiste en secar la muestra de suelo a una temperatura constante.

También se realizó la determinación del contenido de humedad siguiendo la norma ASTM D-2216. Que consiste en pesar la muestra de suelo húmeda para luego introducirla en un horno por 24 horas para pesar el suelo y determinar el contenido de humedad natural del suelo.

Figura 3.10 Contenido de humedad talud N°1 P1



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7 Contenido de humedad Talud 1 P-1

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL			
Platillo	1	2	3
Temperatura de secado °C	120	120	120
Peso de suelo húmedo + platillo (g)	21,99	22,46	23,16
Peso de suelo seco + platillo (g)	20,21	20,45	21,28
Peso del platillo (g)	3,96	3,96	3,96
Peso suelo húmedo (g)	18,03	18,50	19,20
Peso suelo seco (g)	16,25	16,49	17,32
Peso del agua (g)	1,78	2,01	1,88
Contenido de humedad (%)	9,85	10,85	9,80
PROMEDIO	10,17		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.8 Resultados de contenido de humedad

Contenido de humedad					
Talud 1	Pozo 1	10,17 %	Talud 6	Pozo 1	5,95 %
	Pozo 2	6,75 %		Pozo 2	5,05 %
	Pozo 3	7,18 %		Pozo 3	7,93 %
Talud 2	Pozo 1	9,32 %	Talud 7	Pozo 1	11,88 %
	Pozo 2	5,70 %		Pozo 2	7,45 %
	Pozo 3	9,52 %		Pozo 3	7,60 %
Talud 3	Pozo 1	7,53 %	Talud 8	Pozo 1	11,77 %
	Pozo 2	6,50 %		Pozo 2	10,45 %
	Pozo 3	4,07 %		Pozo 3	11,63 %
Talud 4	Pozo 1	6,05 %	Talud 9	Pozo 1	6,13 %
	Pozo 2	9,23 %		Pozo 2	6,74 %
	Pozo 3	10,39 %		Pozo 3	7,95 %
Talud 5	Pozo 1	5,77 %	Talud 10	Pozo 1	6,03 %
	Pozo 2	8,46 %		Pozo 2	8,67 %
	Pozo 3	7,07 %		Pozo 3	7,74 %

Fuente: Elaboración propia

3.4.3. Límites de Atterberg.

Para este ensayo se utiliza el suelo previamente secado que pasa el tamiz N° 40, se verificó que los suelos de este trabajo de investigación son no plásticos en su mayoría.

- **Límite líquido (LL).**

El límite líquido de un suelo refiere al contenido máximo de humedad, a partir de esta frontera un suelo pasa a comportarse de plásticamente a comportarse como un suelo semilíquido. Para este ensayo se utiliza la cuchara de Casagrande.

Se mezcló la muestra de suelo con agua hasta homogenizarla, con la ayuda de una espátula se colocó una porción de la masa en la copa de Casagrande, con un ranurador se realizó un corte al centro de la muestra para dividirla en dos partes y proceder al conteo de golpes con una frecuencia de dos golpes por segundo.

Figura 3.11 Límite líquido (Copa Casagrande)



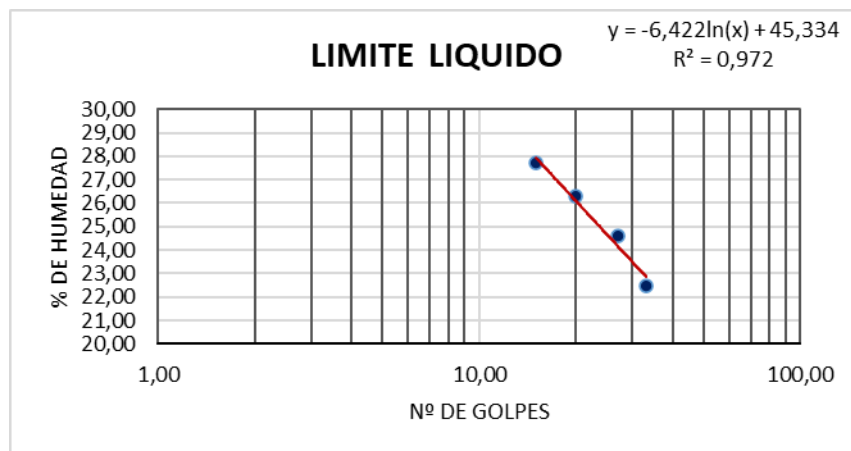
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.9 Determinación de Límite Líquido

Capsula N°	1	2	3	4
N° de golpes	15,00	20,00	27,00	33,00
Masa suelo húmedo + cápsula (g)	43,82	49,61	48,79	44,46
Masa suelo seco + cápsula (g)	38,77	43,95	42,48	39,05
Masa del agua (g)	5,05	5,66	6,31	5,41
Masa de cápsula (g)	20,54	22,44	16,81	15,00
Masa de suelo seco (g)	18,23	21,51	25,67	24,05
Porcentaje de humedad (%)	27,70	26,31	24,58	22,49

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12 Curva gráfica de límite líquido



Fuente: Elaboración propia

- **Límite plástico.**

El límite plástico de un suelo refiere el contenido de humedad correspondiente. Esta frontera se presenta cuando un suelo pasa de un estado semisólido a un estado plástico.

Del suelo ya homogenizado se extrajeron 3 porciones pequeñas que fueron amasadas con la mano, con la ayuda de una base de vidrio se moldeó cada muestra en rollitos de aproximadamente 3mm. hasta que se produjo agrietamiento por la pérdida de humedad.

Figura 3.13 Límite plástico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.10 Determinación del Límite Plástico

Cápsula	1	2	3
Masa suelo húmedo + cápsula (g)	15,63	15,23	16,98
Masa suelo seco + cápsula (g)	15,46	15,01	16,75
Masa de cápsula (g)	14,50	13,90	15,50
Peso de suelo seco	0,96	1,11	1,25
Peso del agua	0,17	0,22	0,23
Contenido de humedad	17,71	19,82	18,40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.11 Resultados de límites de Atterberg Talud 1 P-1

Límite Líquido (LL)
25
Límite Plástico (LP)
19
Índice de plasticidad (IP)
6
Índice de Grupo (IG)
2

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.12 Resultados de Limites de Atterberg

Límites de Atterberg					
Talud	Pozo	L.L.	L.P.	I.P.	I.G.
Talud 1	Pozo 1	25	19	6	2
	Pozo 2	21	14	7	1
	Pozo 3	21	18	3	0
Talud 2	Pozo 1	N.P.			
	Pozo 2	22	19	2	0
	Pozo 3	21	15	5	0
Talud 3	Pozo 1	N.P.			
	Pozo 2	N.P.			
	Pozo 3	N.P.			
Talud 4	Pozo 1	N.P.			
	Pozo 2	23	21	2	0
	Pozo 3	N.P.			
Talud 5	Pozo 1	N.P.			
	Pozo 2	27	16	11	0
	Pozo 3	N.P.			
Talud 6	Pozo 1	26	16	10	0
	Pozo 2	26	17	9	0
	Pozo 3	N.P.			
Talud 7	Pozo 1	N.P.			
	Pozo 2	N.P.			
	Pozo 3	N.P.			
Talud 8	Pozo 1	N.P.			
	Pozo 2	N.P.			
	Pozo 3	N.P.			
Talud 9	Pozo 1	N.P.			
	Pozo 2	N.P.			
	Pozo 3	N.P.			
Talud 10	Pozo 1	N.P.			
	Pozo 2	N.P.			
	Pozo 3	N.P.			

Fuente: Elaboración propia

3.4.4. Clasificación de los suelos.

La clasificación de los suelos del presente trabajo se realizó mediante los sistemas SUCS y AASHTO.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) es un sistema utilizado en ingeniería y geología para clasificar los suelos según su textura y tamaño de partículas. El SUCS organiza los suelos en diferentes categorías, como suelos arenosos, suelos limosos, suelos arcillosos, suelos orgánicos y suelos mixtos. Cada categoría tiene subcategorías que describen las características específicas del suelo, como la cantidad de partículas finas, la plasticidad y la cohesión.

La clasificación de suelos según el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) se basa en la composición granulométrica, el límite líquido y el índice de plasticidad de los suelos. Este sistema clasifica los suelos en siete grupos principales, designados como A-1 a A-7.

Tabla 3.13 Clasificación de suelos Talud 1 P-1

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL			
Platillo	1	2	3
Temperatura de secado °C	120	120	120
Peso de suelo húmedo + platillo (g)	21,99	22,46	23,16
Peso de suelo seco + platillo (g)	20,21	20,45	21,28
Peso del platillo (gr	3,96	3,96	3,96
Peso suelo húmedo (g)	18,03	18,50	19,20
Peso suelo seco (g)	16,25	16,49	17,32
Peso del agua (g)	1,78	2,01	1,88
Contenido de humedad (%)	9,85	10,85	9,80
PROMEDIO	10,17		

CLASIFICACIÓN DEL SUELO	AASHTO:	A-4 ₍₂₎
	SUCS:	SC
DESCRIPCIÓN	Arena arcillosa con grava.	

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.14 Resultados de clasificación

Clasificación					
Talud	AASHTO	SUCS	Talud	AASHTO	SUCS
T1-1	A-4(2)	SC	T6-1	A-2-4(0)	SC
T1-2	A-4(1)	SC	T6-2	A-2-4(0)	GC
T1-3	A-2-4(0)	GC	T6-3	A-1-a(0)	GP-GM
T2-1	A-1-b(0)	GM	T7-1	A-1-a(0)	GM
T2-2	A-1-a(0)	GM	T7-2	A-1-a(0)	GP-GM
T2-3	A-2-4(0)	GM-GC	T7-3	A-1-a(0)	GP-GM
T3-1	A-2-4(0)	GM	T8-1	A-1-a(0)	GP-GM
T3-2	A-1-a(0)	GM	T8-2	A-1-b(0)	SM
T3-3	A-1-a(0)	GP-GM	T8-3	A-1-a(0)	GM
T4-1	A-1-a(0)	GM	T9-1	A-1-a(0)	GP-GM
T4-2	A-2-4(0)	SM	T9-2	A-1-a(0)	GP-GM
T4-3	A-1-b(0)	SM	T9-3	A-1-a(0)	GP-GM
T5-1	A-1-a(0)	GP-GM	T10-1	A-1-a(0)	GP-GM
T5-2	A-2-6(0)	GC	T10-2	A-1-a(0)	GP-GM
T5-3	A-1-a(0)	GP-GM	T10-3	A-1-a(0)	GM

Fuente: Elaboración propia

3.4.5. Peso específico.

El peso volumétrico en estado natural del suelo o peso específico de la masa de suelo, es la relación entre el peso del mismo y el volumen que ocupa con respecto al peso específico del agua destilada. A mayor peso específico será menor la permeabilidad.

Para este ensayo se realizó la preparación del suelo donde se pasó el material por el tamiz N° 10 y secarlo en un horno durante 24 horas para así obtener una muestra de 80 g.

Se calibró un frasco volumétrico con marca de enrase donde se introdujo la muestra de suelo para luego añadir agua destilada hasta el 50 % del frasco volumétrico y a baño maría llegar a una temperatura de 60 °C. Se completó la capacidad del frasco con agua destilada y con la ayuda de hielo se redujo la temperatura para tomar la medida de peso y temperatura a diferentes intervalos que estuvieron dentro del rango de 15 – 30 ° C.

Figura 3.14 Calibración de frasco volumétrico



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.15 Tamizado de suelo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.16 Baño María (Caliente y Frio)



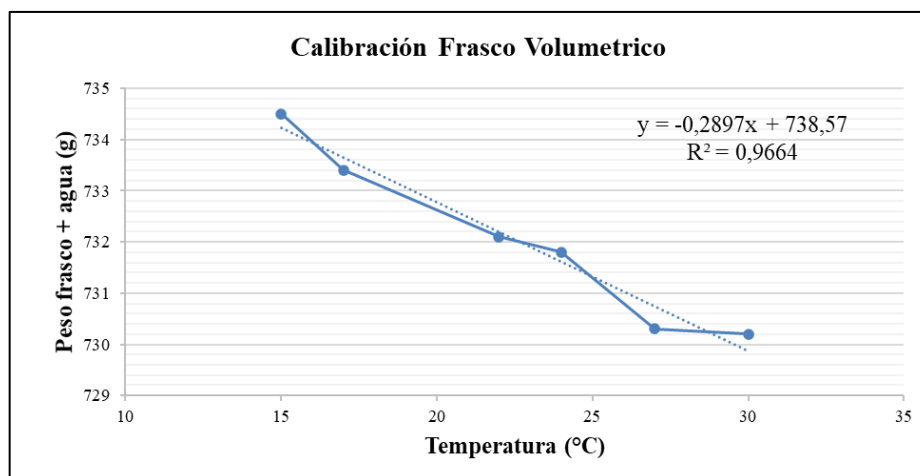
Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.15 Valores de calibración de frasco

Peso del frasco limpio (vacío-seco) (g) =		256,6
Wfw (g)= Peso del frasco + agua		779,8
T(°C) = Temperatura		
Numero de ensayo	Temp. (°C)	Wfw (g)
1	30	730,2
2	27	730,30
3	24	731,8
4	22	732,1
5	17	733,4
6	15	734,5

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.17 Calibración de frasco volumétrico



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.16 Peso específico Talud 1 P-1

PESO ESPECÍFICO AGREGADO FINO				
	1	2	3	Prom.
Temperatura ensayada	30	25	20	
Peso del suelo seco Ws	78	78	78	
Peso del frasco mas agua * Wfw	729,88	731,33	732,78	
Peso del frasco+agua+suelo Wfws	779,5	780,2	780,8	
Peso específico	2,749	2,678	2,602	
Factor de corrección K	0,9974	0,9989	1,0000	
Peso específico corregido	2,741	2,675	2,602	2,673

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.17 Resultados de peso específico

Peso específico							
Talud 1	Pozo 1	2,67 g/cm ³	26,18 KN/m ³	Talud 6	Pozo 1	2,56 g/cm ³	25,10 KN/m ³
	Pozo 2	2,62 g/cm ³	25,69 KN/m ³		Pozo 2	2,49 g/cm ³	24,42 KN/m ³
	Pozo 3	2,45 g/cm ³	24,03 KN/m ³		Pozo 3	2,40 g/cm ³	23,54 KN/m ³
Talud 2	Pozo 1	2,58 g/cm ³	25,20 KN/m ³	Talud 7	Pozo 1	2,59 g/cm ³	25,40 KN/m ³
	Pozo 2	2,53 g/cm ³	24,81 KN/m ³		Pozo 2	2,63 g/cm ³	25,79 KN/m ³
	Pozo 3	2,67 g/cm ³	26,18 KN/m ³		Pozo 3	2,75 g/cm ³	26,97 KN/m ³
Talud 3	Pozo 1	2,60 g/cm ³	25,50 KN/m ³	Talud 8	Pozo 1	2,55 g/cm ³	25,01 KN/m ³
	Pozo 2	2,58 g/cm ³	25,30 KN/m ³		Pozo 2	2,67 g/cm ³	26,97 KN/m ³
	Pozo 3	2,46 g/cm ³	24,12 KN/m ³		Pozo 3	2,66 g/cm ³	26,97 KN/m ³
Talud 4	Pozo 1	2,54 g/cm ³	24,91 KN/m ³	Talud 9	Pozo 1	2,58 g/cm ³	25,30 KN/m ³
	Pozo 2	2,70 g/cm ³	26,48 KN/m ³		Pozo 2	2,59 g/cm ³	25,40 KN/m ³
	Pozo 3	2,67 g/cm ³	26,18 KN/m ³		Pozo 3	2,57 g/cm ³	25,20 KN/m ³
Talud 5	Pozo 1	2,74 g/cm ³	26,87 KN/m ³	Talud 10	Pozo 1	2,58 g/cm ³	25,30 KN/m ³
	Pozo 2	2,88 g/cm ³	28,24 KN/m ³		Pozo 2	2,48 g/cm ³	24,32 KN/m ³
	Pozo 3	2,77 g/cm ³	27,16 KN/m ³		Pozo 3	2,57 g/cm ³	25,20 KN/m ³

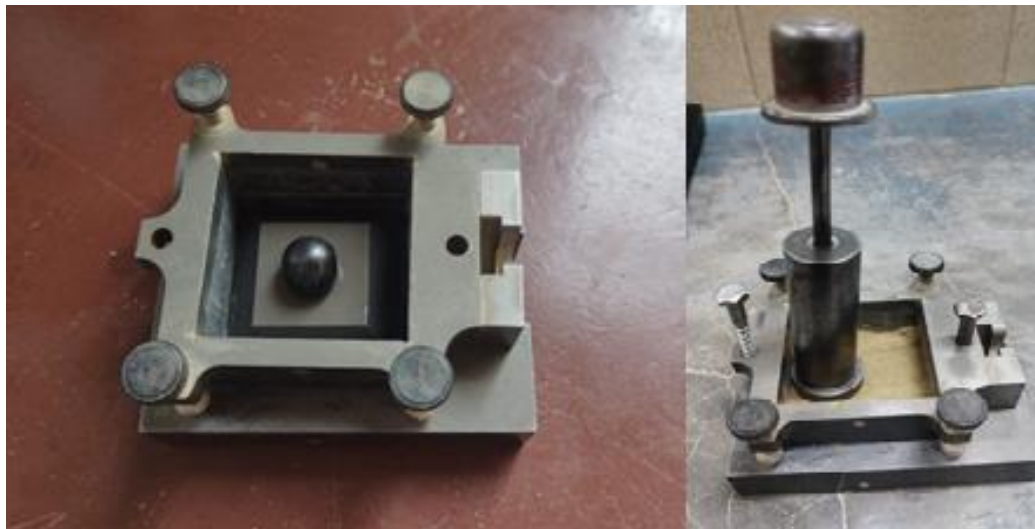
Fuente: Elaboración propia

3.4.6. Corte directo.

El ensayo de corte directo nos brinda parámetros fundamentales dentro la mecánica de suelos tales como el Ángulo de fricción (ϕ) y la Cohesión (c), estos parámetros nos ayudan en la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante de suelos o en este caso de los taludes.

Para este ensayo la muestra se tamizó por el tamiz N° 10, luego se procedió a compactar el suelo dentro de la caja de corte con dimensiones de 6*6 cm. y 2.5 cm. de altura. Para la compactación del suelo se realizó en 3 capas y se dio 25 golpes por capa con ayuda de un pisón.

Figura 3.18 Caja de corte y pisón pequeño



Fuente: Elaboración propia

Después de compactar el suelo hasta la densidad del mismo se procedió a armar la muestra en el equipo de corte directo, aplicando una carga (1, 2 y 3 Kg.) y colocar los extensómetros en 0 se procede a saturar el suelo con agua por 24 horas.

Luego de saturar el suelo se evacua el agua de excedencia y se comienza a realizar el corte a una velocidad 0.5 mm/s. hasta que se produzca el corte de la muestra.

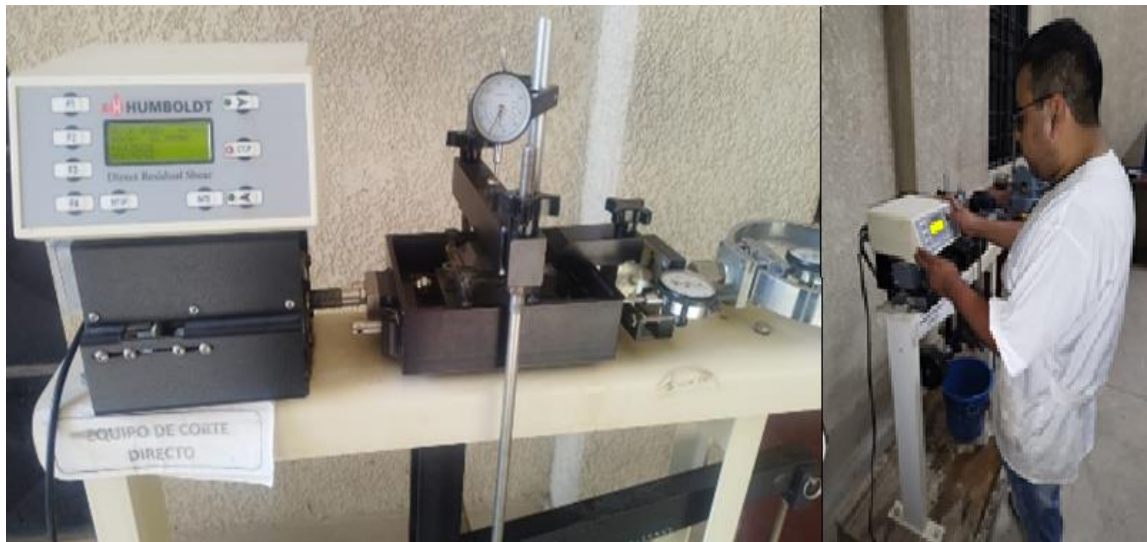
Por último, se calcula el contenido de humedad, se pesó el suelo húmedo y se introdujo la muestra al horno por 24 horas.

Figura 3.19 Caja de corte – Pesas



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.20 Equipo de corte directo



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.21 Muestra de suelo húmeda - seca



Fuente: Elaboración propia

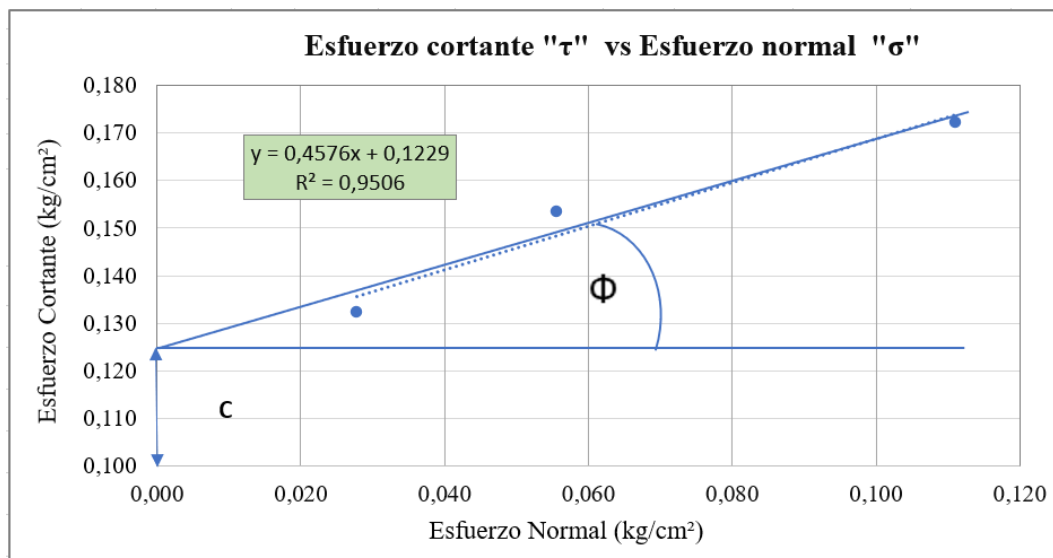
Una vez obtenido los datos se procede a la obtención de la cohesión y ángulo de fricción de los suelos en gabinete.

Tabla 3.18 Valores para determinar cohesión y ángulo de fricción

Lectura Horizontal	Lectura Ext. Vertical			Lectura de anillo de carga			Deformación Horizontal (mm)	Deformación Vertical (mm)			Fuerza cortante (Kg)			Esfuerzo cortante (Kg/cm²)		
	1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00		1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00	1,00	2,00	4,00
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0000	0,0000	0,0000
5	3,00	0,00	10,00	0,30	0,50	0,85	0,127	0,008	0,000	0,025	4,088	4,257	4,552	0,1136	0,1182	0,1264
10	6,00	2,50	15,00	0,40	0,60	1,00	0,254	0,015	0,006	0,038	4,172	4,341	4,678	0,1159	0,1206	0,1300
15	7,50	7,50	19,00	0,50	0,80	1,10	0,381	0,019	0,019	0,048	4,257	4,510	4,763	0,1182	0,1253	0,1323
20	8,00	13,00	22,50	0,60	0,90	1,30	0,508	0,020	0,033	0,057	4,341	4,594	4,931	0,1206	0,1276	0,1370
25	9,00	19,00	26,50	0,70	1,00	1,40	0,635	0,023	0,048	0,067	4,425	4,678	5,015	0,1229	0,1300	0,1393
30	10,00	23,00	31,00	0,75	1,10	1,50	0,762	0,025	0,058	0,079	4,468	4,763	5,100	0,1241	0,1323	0,1417
35	11,50	28,00	34,00	0,80	1,20	1,60	0,889	0,029	0,071	0,086	4,510	4,847	5,184	0,1253	0,1346	0,1440
40	13,00	31,00	37,00	0,85	1,30	1,70	1,016	0,033	0,079	0,094	4,552	4,931	5,268	0,1264	0,1370	0,1463
45	14,00	35,00	45,00	0,90	1,40	2,00	1,143	0,036	0,089	0,114	4,594	5,015	5,521	0,1276	0,1393	0,1534
50	14,50	38,00	46,00	0,90	1,40	2,05	1,270	0,037	0,097	0,117	4,594	5,015	5,563	0,1276	0,1393	0,1545
55	15,00	40,00	48,00	0,95	1,40	2,10	1,397	0,038	0,102	0,122	4,636	5,015	5,606	0,1288	0,1393	0,1557
60	15,00	42,00	50,00	1,00	1,50	2,20	1,524	0,038	0,107	0,127	4,678	5,100	5,690	0,1300	0,1417	0,1581
65	15,00	44,00	52,00	1,00	1,60	2,20	1,651	0,038	0,112	0,132	4,678	5,184	5,690	0,1300	0,1440	0,1581
70	15,00	48,00	55,00	1,00	1,65	2,30	1,778	0,038	0,122	0,140	4,678	5,226	5,774	0,1300	0,1452	0,1604
75	15,00	49,00	56,00	1,00	1,70	2,30	1,905	0,038	0,124	0,142	4,678	5,268	5,774	0,1300	0,1463	0,1604
80	15,00	50,00	58,00	1,05	1,70	2,35	2,032	0,038	0,127	0,147	4,720	5,268	5,816	0,1311	0,1463	0,1616
85	14,50	51,00	59,00	1,05	1,75	2,40	2,159	0,037	0,130	0,150	4,720	5,311	5,858	0,1311	0,1475	0,1627
90	14,00	52,00	60,00	1,10	1,80	2,50	2,286	0,036	0,132	0,152	4,763	5,353	5,943	0,1323	0,1487	0,1651
95	13,50	52,00	60,00	1,10	1,80	2,50	2,413	0,034	0,132	0,152	4,763	5,353	5,943	0,1323	0,1487	0,1651
100		52,00	61,00		1,85	2,55	2,540		0,132	0,155		5,395	5,985		0,1499	0,1662
105		52,00	61,00		1,85	2,60	2,667		0,132	0,155		5,395	6,027		0,1499	0,1674
110		52,00	61,00		1,90	2,60	2,794		0,132	0,155		5,437	6,027		0,1510	0,1674
115		52,00	61,00		1,90	2,65	2,921		0,132	0,155		5,437	6,069		0,1510	0,1686
120		52,00	61,00		1,90	2,70	3,048		0,132	0,155		5,437	6,111		0,1510	0,1698
125		52,00	61,50		1,95	2,00	3,175		0,132	0,156		5,479	5,521		0,1522	0,1534
130		52,00	62,00		2,00	2,70	3,302		0,132	0,157		5,521	6,111		0,1534	0,1698
135		52,00	63,00		2,00	2,75	3,429		0,132	0,160		5,521	6,154		0,1534	0,1709
140			64,00			2,80	3,556			0,163			6,196			0,1721
145			65,00			2,80	3,683			0,165			6,196			0,1721
150			65,00			2,80	3,810			0,165			6,196			0,1721
155			65,00			2,80	3,937			0,165			6,196			0,1721
160			65,00			2,80	4,064			0,165			6,196			0,1721
165			65,00			2,80	4,191			0,165			6,196			0,1721

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.22 Cohesión y ángulo de fricción



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.19 Esfuerzo normal y de corte

Esfuerzo Normal Kg/cm²	Esfuerzo de Corte Kg/cm²
0,028	0,13229
0,056	0,15337
0,111	0,17210

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.20 Cálculo de cohesión y esfuerzo de corte

COHESIÓN	ϕ
0,123	24,59

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.21 Resultados de corte directo

Corte directo							
Talud	Pozo	Cohesión	Ø	Talud	Pozo	Cohesión	Ø
Talud 1	Pozo 1	0,123	24,59	Talud 6	Pozo 1	0,136	26,42
	Pozo 2	0,123	24,87		Pozo 2	0,137	30,03
	Pozo 3	0,118	33,28		Pozo 3	0,117	28,19
Talud 2	Pozo 1	0,124	32,06	Talud 7	Pozo 1	0,124	36,52
	Pozo 2	0,126	37,19		Pozo 2	0,119	25,72
	Pozo 3	0,116	24,59		Pozo 3	0,128	28,98
Talud 3	Pozo 1	0,122	31,68	Talud 8	Pozo 1	0,130	30,03
	Pozo 2	0,132	34,93		Pozo 2	0,118	31,00
	Pozo 3	0,148	26,00		Pozo 3	0,130	36,30
Talud 4	Pozo 1	0,131	34,70	Talud 9	Pozo 1	0,116	28,98
	Pozo 2	0,121	30,70		Pozo 2	0,119	30,29
	Pozo 3	0,131	27,38		Pozo 3	0,128	30,03
Talud 5	Pozo 1	0,116	24,59	Talud 10	Pozo 1	0,138	29,38
	Pozo 2	0,115	33,76		Pozo 2	0,133	35,62
	Pozo 3	0,116	31,81		Pozo 3	0,133	36,08

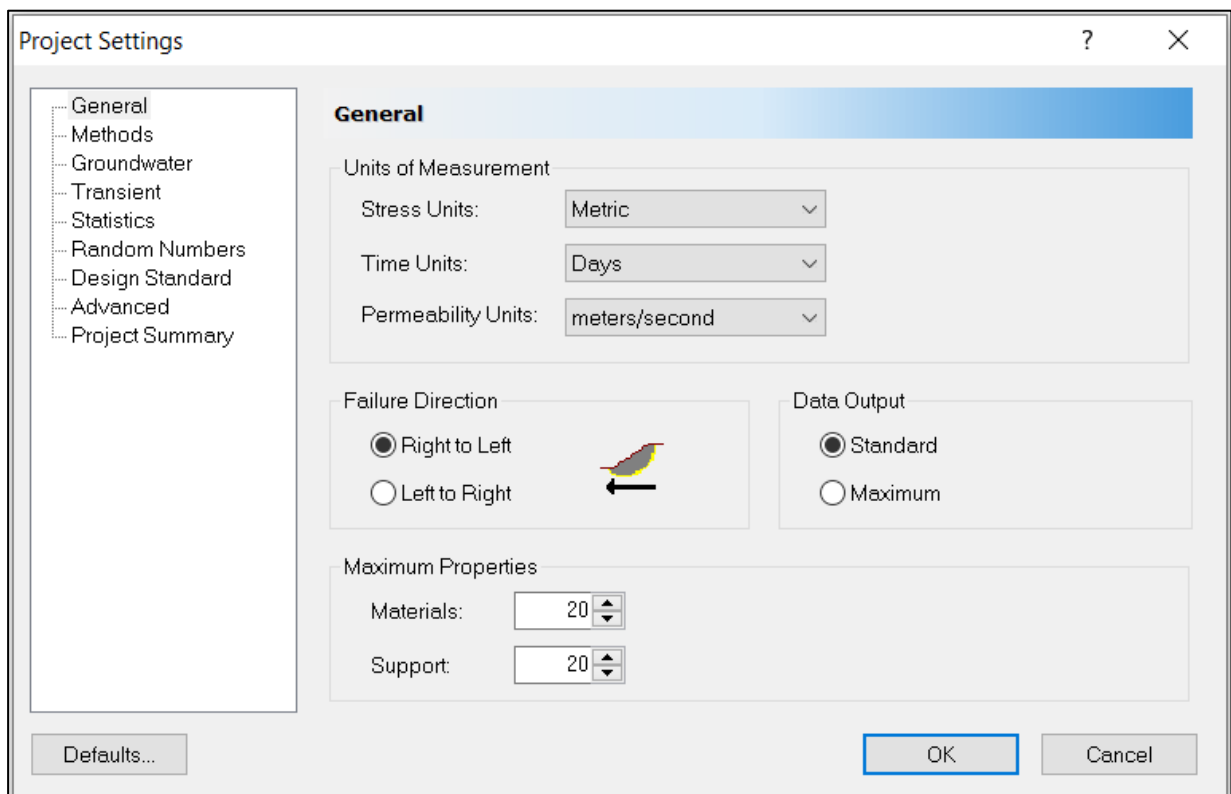
Fuente: Elaboración propia

3.5. DETERMINACIÓN DEL F.S. EN EL TRAMO DE ESTUDIO.

Para el presente proyecto se utilizó el método de Fellenius y se realizó el siguiente procedimiento:

Dentro del programa vamos a: “análisis” y definimos las “características generales y específicas del proyecto” (unidades, sentido de la falla, métodos a utilizar, cantidad de dovelas, nombre del proyecto, etc.).

Figura 3.23 Configuración general del proyecto



Fuente: Elaboración propia

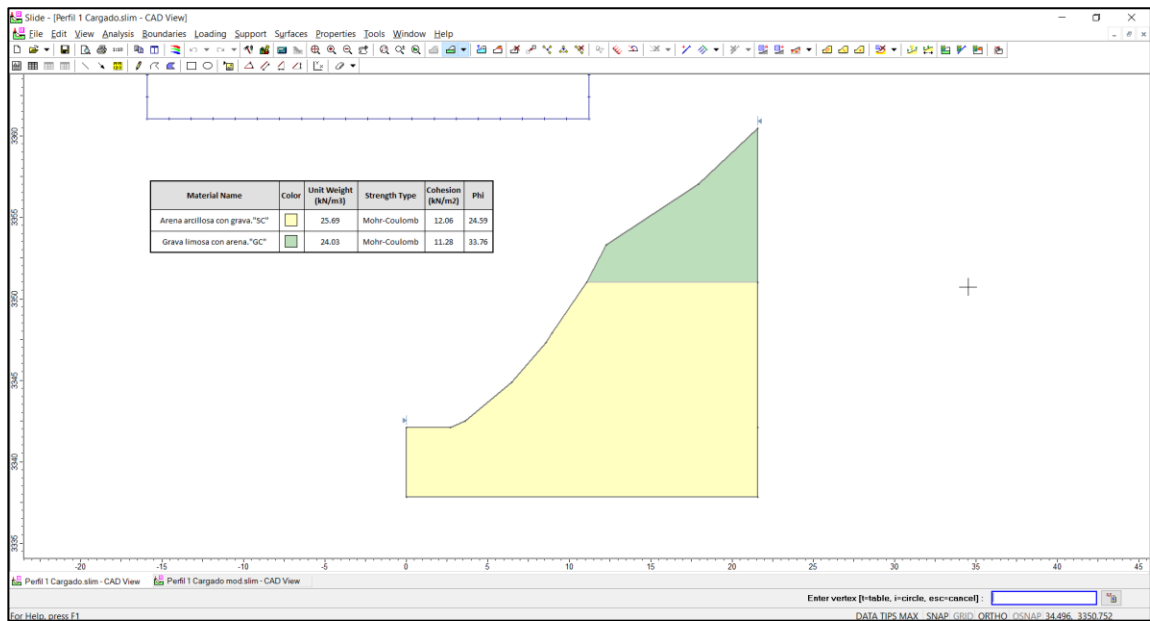
Se procede delimitar el perfil del talud, se tomó la sección más crítica del talud y se introdujo las coordenadas (elevación y longitud)

Figura 3.24 Coordenadas de perfil más crítico del talud

Point	X	Y
1	0	3.342.099
2	2.69	3.342.119
3	3.63	3.342.513
4	6.46	3.344.891
5	8.57	3.347.347
6	8.57	3.347.347
7	8.96	3.347.908
8	11.08	3.351.02
9	12.26	3.353.325
10	17.93	3.357.057
11	21.57	3.360.475
12		
13		

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.25 Perfil del talud



Fuente: Elaboración propia

Una vez definido el perfil, se procede a definir los límites de los estratos de material del talud y a dar las características de los materiales en la ventana “propiedades”, opción “definir propiedades de los materiales”.

Figura 3.26 Propiedades de los materiales

Define Material Properties

Arena arcillosa con grava."SC"

Name: Colour: Hatch:

Unit Weight: kN/m3 ☐ Saturated U.W. kN/m3

Strength Type: $\tau = c' + \sigma'_n \tan \phi'$

Strength Parameters

Cohesion: kN/m2 Phi: degrees

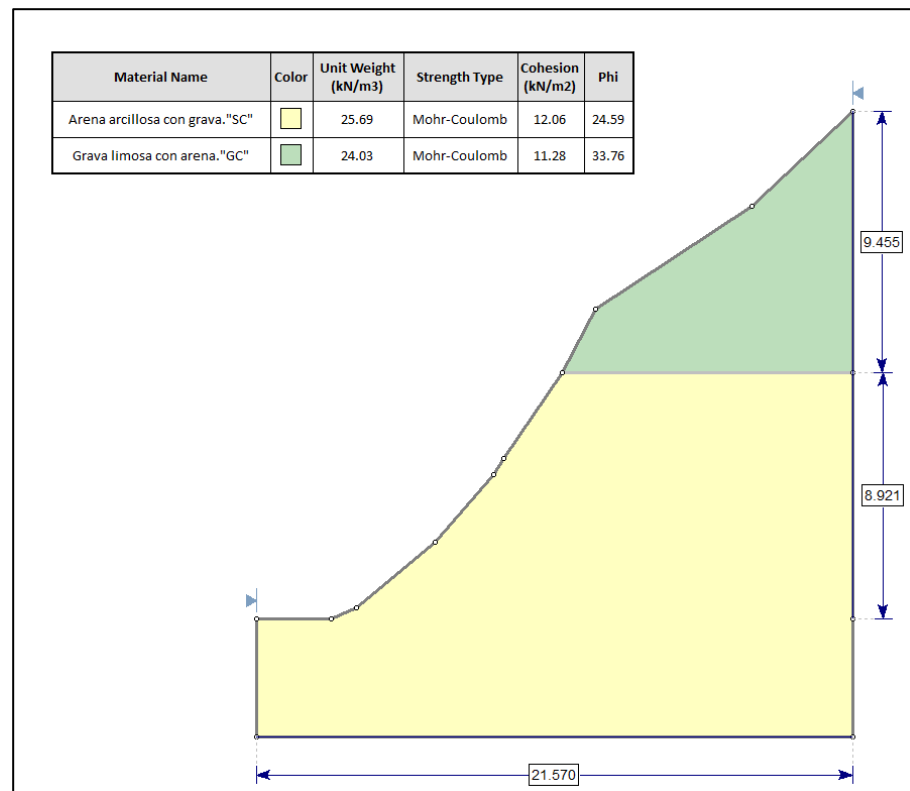
Water Parameters

Water Surface: Ru Value:

☐ Show only properties used in model

Fuente: Elaboración propia

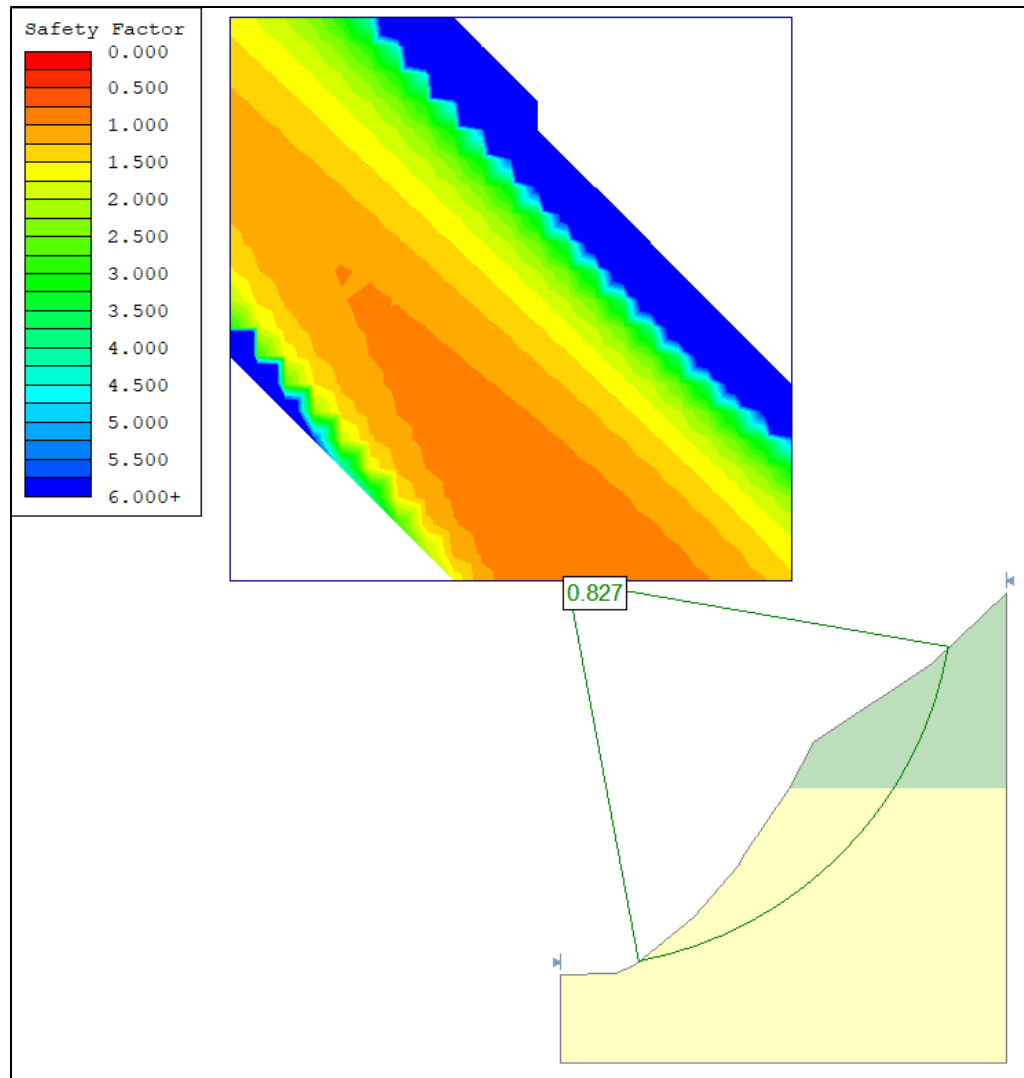
Figura 3.27 Propiedades y dimensiones del talud



Fuente: Elaboración propia

Luego se realiza el análisis del factor de seguridad del talud en su estado natural.

Figura 3.28 Factor de seguridad de talud 1



Fuente: Elaboración propia

El factor de seguridad del talud 1 da como resultado un $FS=0.827$. Lo que indica que el talud es inestable por lo cual se procede a la estabilización cambiando la geometría del talud.

3.5.1. Cálculo del F.S. talud 1.

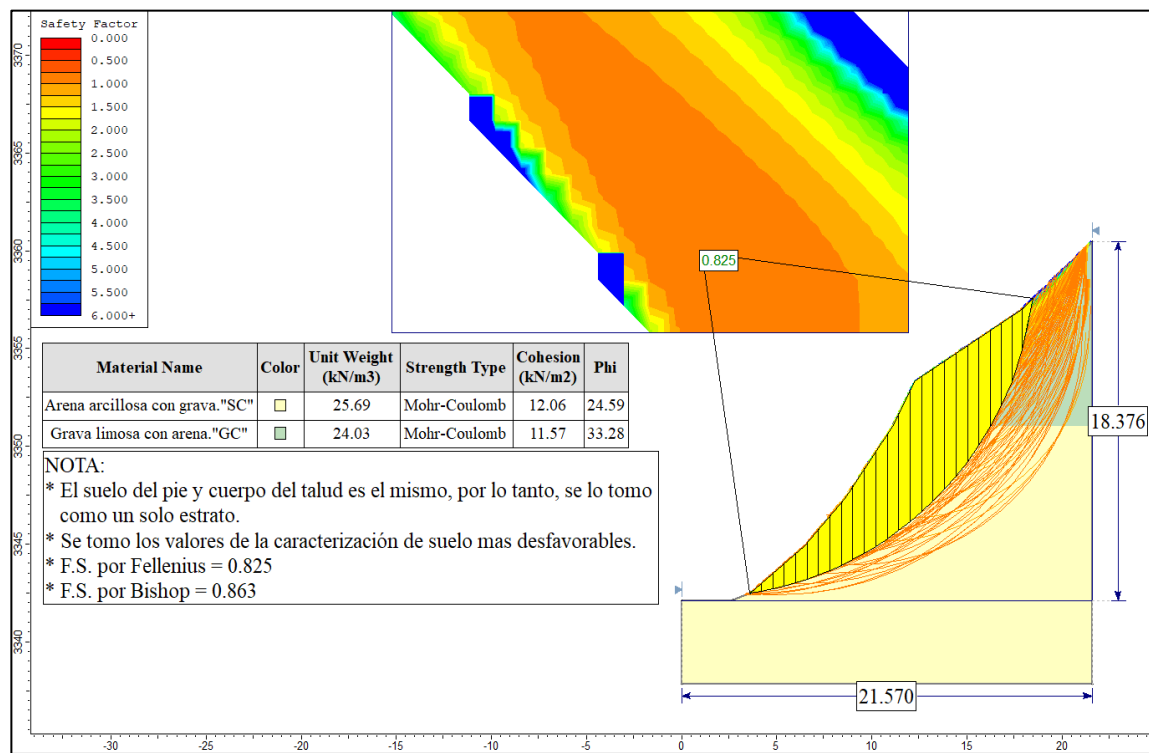
A continuación, se muestran los datos que son necesarios para realizar el cálculo del factor de seguridad del talud.

Tabla 3.22 Datos de talud 1

Talud	Parte del talud	Clasificación SUCS	Peso específico		Cohesión		Ángulo de fricción
			g/cm ³	KN/m ³	Kg/cm ²	KN/m ²	
Talud 1	Pie	SC	2,67	26,18	0,123	12,06	24,59 °
	Cuerpo	SC	2,62	25,69	0,123	12,06	24,87 °
	Cabeza	GC	2,45	24,03	0,118	11,57	33,28 °

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.29 Análisis de talud 1



Fuente: Elaboración propia

3.5.2. Cálculo del F.S. talud 2.

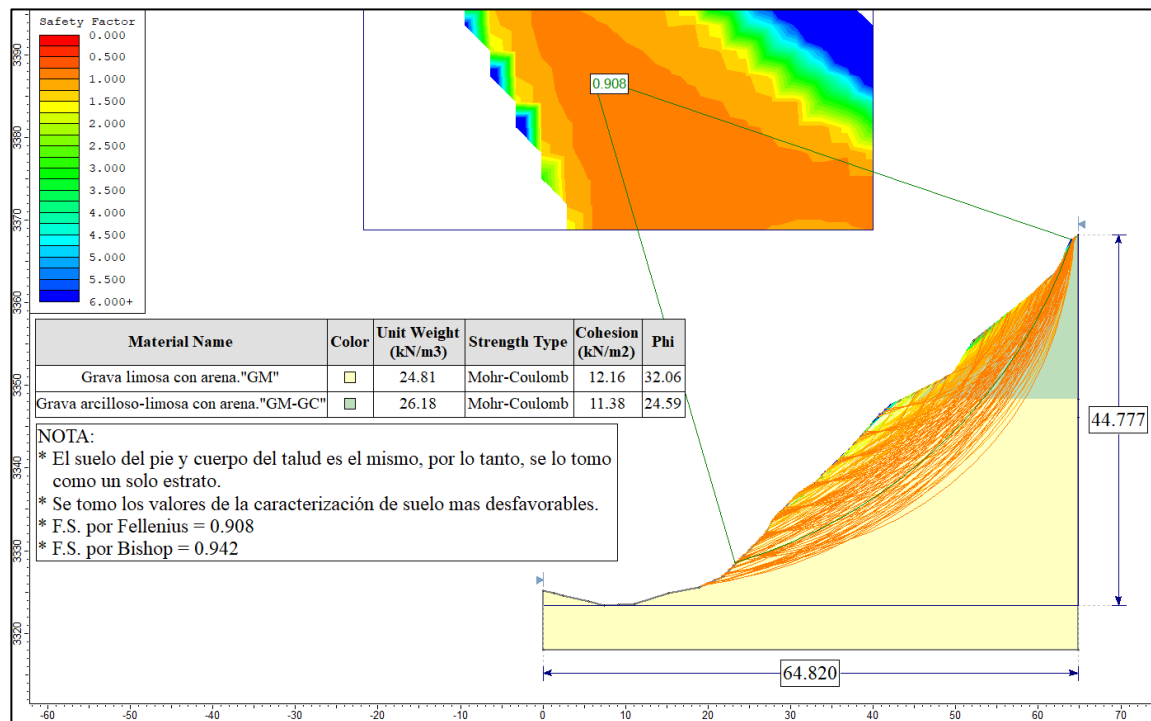
A continuación, se muestran los datos que son necesarios para realizar el cálculo del factor de seguridad del talud.

Tabla 3.23 Datos de talud 2

Talud	Parte del talud	Clasificación SUCS	Peso específico		Cohesión		Ángulo de fricción
			g/cm ³	KN/m ³	Kg/cm ²	KN/m ²	
Talud 2	Pie	GM	2,58	25,20	0,124	12,16	32,06 °
	Cuerpo	GM	2,53	24,81	0,126	12,36	37,19 °
	Cabeza	GM-GC	2,67	26,18	0,116	11,38	24,59 °

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.30 Análisis de talud 2



Fuente: Elaboración propia

3.5.3. Cálculo del F.S. talud 3.

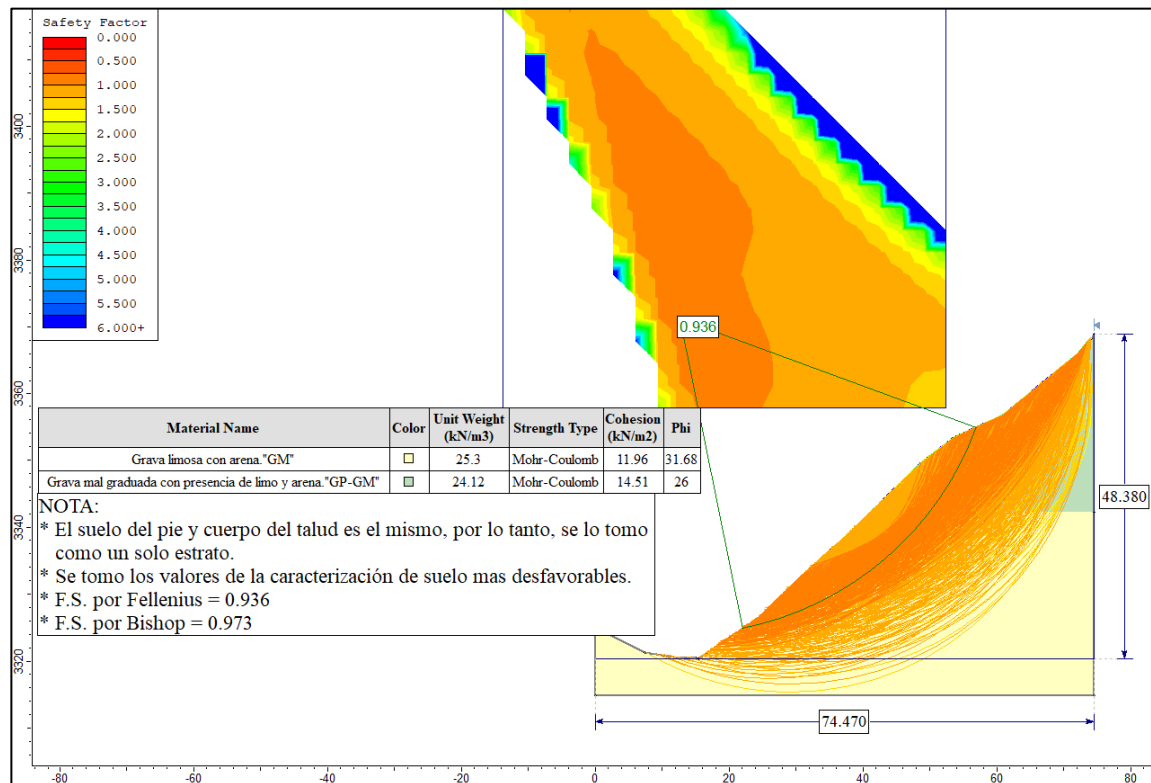
A continuación, se muestran los datos que son necesarios para realizar el cálculo del factor de seguridad del talud.

Tabla 3.24 Datos de talud 3

Talud	Parte del talud	Clasificación SUCS	Peso específico		Cohesión		Ángulo de fricción
			g/cm ³	KN/m ³	Kg/cm ²	KN/m ²	
Talud 3	Pie	GM	2,60	25,50	0,122	11,96	31,68 °
	Cuerpo	GM	2,58	25,30	0,132	12,94	34,93 °
	Cabeza	GP-GM	2,46	24,12	0,148	14,51	26,00 °

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.31 Análisis de talud 3



Fuente: Elaboración propia

3.5.4. Cálculo del F.S. talud 4.

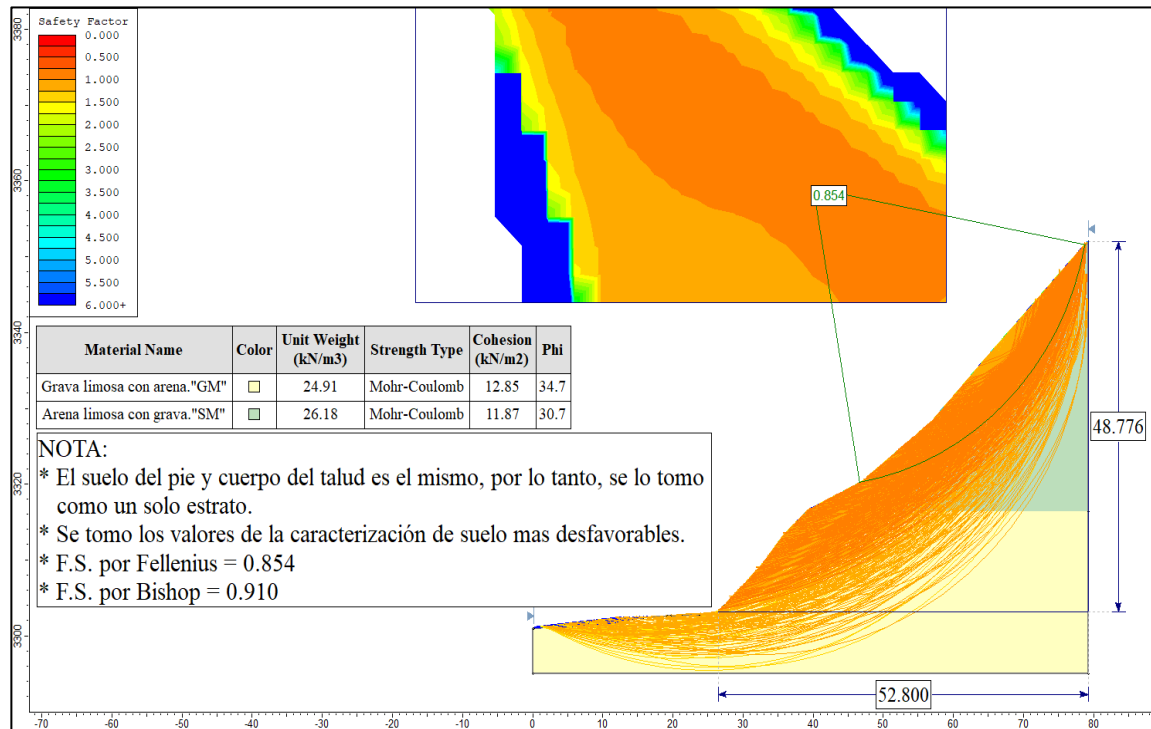
A continuación, se muestran los datos que son necesarios para realizar el cálculo del factor de seguridad del talud.

Tabla 3.25 Datos de talud 4

Talud	Parte del talud	Clasificación SUCS	Peso específico		Cohesión		Ángulo de fricción
			g/cm ³	KN/m ³	Kg/cm ²	KN/m ²	
Talud 4	Pie	GM	2,54	24,91	0,131	12,85	34,70 °
	Cuerpo	SM	2,70	26,48	0,121	11,87	30,70 °
	Cabeza	SM	2,67	26,18	0,131	12,85	27,38 °

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.32 Análisis de talud 4



Fuente: Elaboración propia

3.5.5. Cálculo del F.S. talud 5.

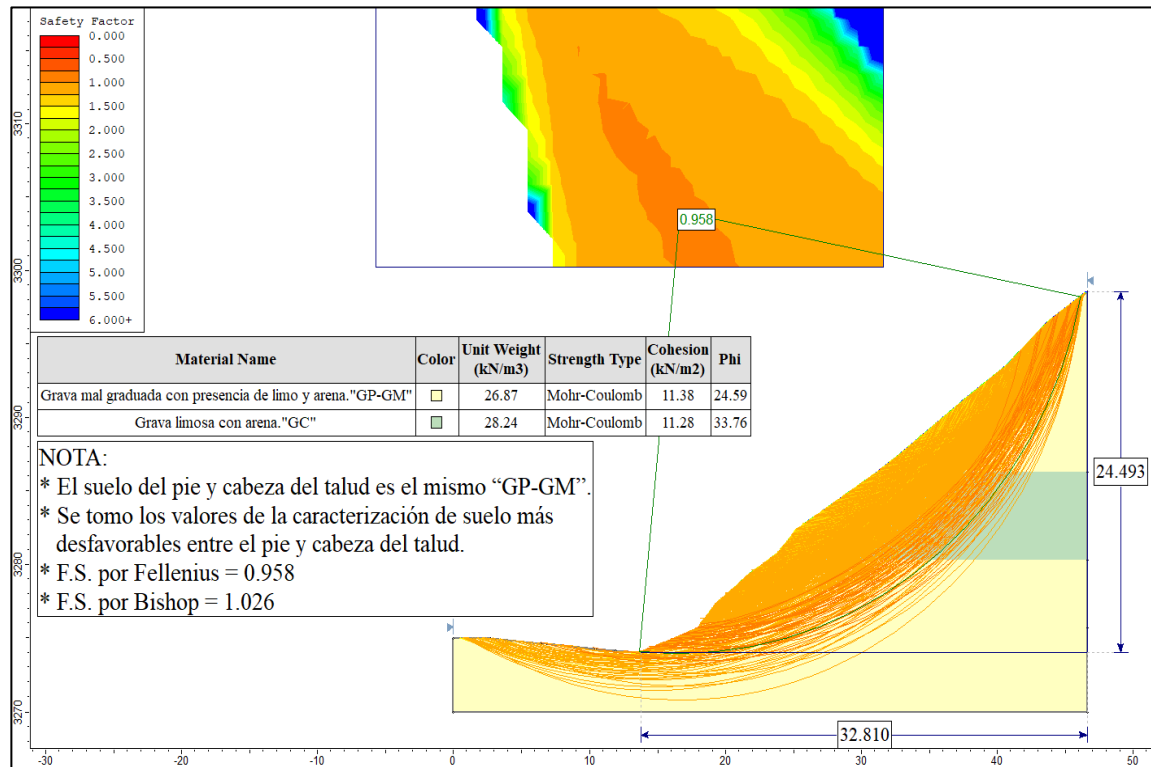
A continuación, se muestran los datos que son necesarios para realizar el cálculo del factor de seguridad del talud.

Tabla 3.26 Datos de talud 5

Talud	Parte del talud	Clasificación SUCS	Peso específico		Cohesión		Ángulo de fricción
			g/cm ³	KN/m ³	Kg/cm ²	KN/m ²	
Talud 5	Pie	GP-GM	2,74	26,87	0,116	11,38	24,59 °
	Cuerpo	GC	2,88	28,24	0,115	11,28	33,76 °
	Cabeza	GP-GM	2,77	27,16	0,116	11,38	31,81 °

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.33 Análisis de talud 5



Fuente: Elaboración propia

3.5.6. Cálculo del F.S. talud 6.

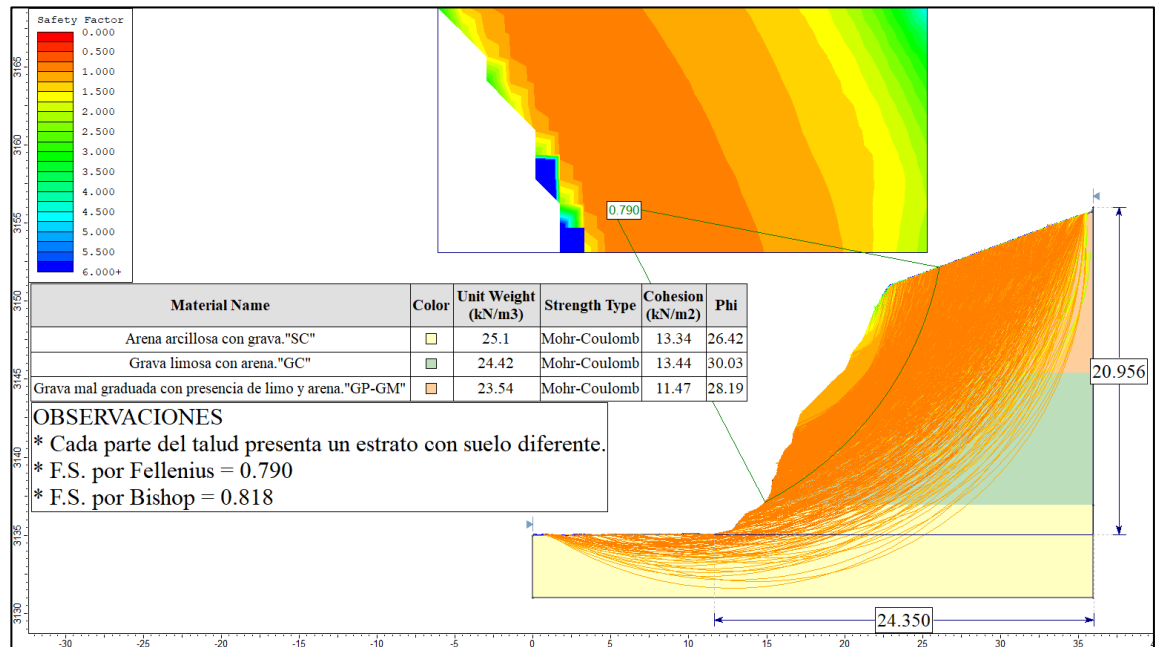
A continuación, se muestran los datos que son necesarios para realizar el cálculo del factor de seguridad del talud.

Tabla 3.27 Datos de talud 6

Talud	Parte del talud	Clasificación SUCS	Peso específico		Cohesión		Ángulo de fricción
			g/cm ³	KN/m ³	Kg/cm ²	KN/m ²	
Talud 6	Pie	SC	2,56	25,10	0,136	13,34	26,42 °
	Cuerpo	GC	2,49	24,42	0,137	13,44	30,03 °
	Cabeza	GP-GM	2,40	23,54	0,117	11,47	28,19 °

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.34 Análisis de talud 6



Fuente: Elaboración propia

3.5.7. Cálculo del F.S. talud 7.

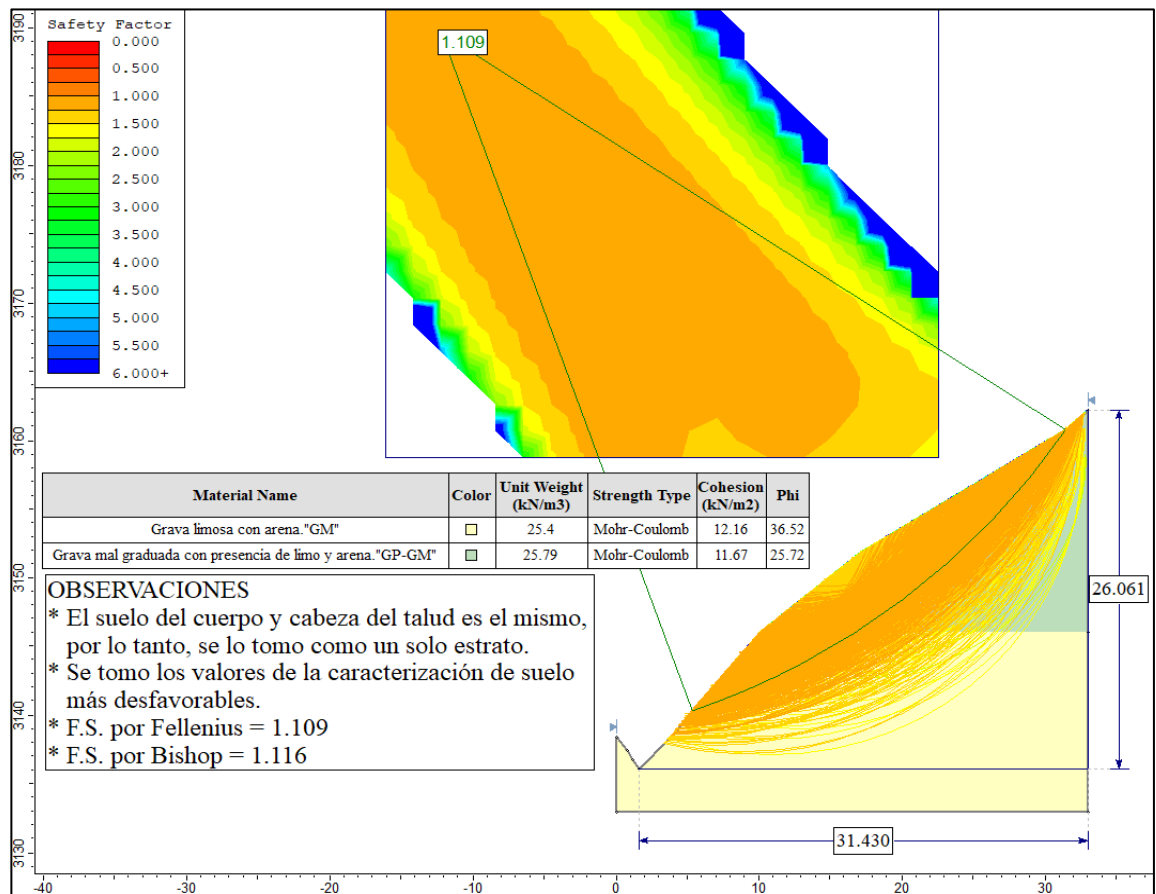
A continuación, se muestran los datos que son necesarios para realizar el cálculo del factor de seguridad del talud.

Tabla 3.28 Datos de talud 7

Talud	Parte del talud	Clasificación SUCS	Peso específico		Cohesión		Ángulo de fricción
			g/cm ³	KN/m ³	Kg/cm ²	KN/m ²	
Talud 7	Pie	GM	2,59	25,40	0,124	12,16	36,52 °
	Cuerpo	GP-GM	2,63	25,79	0,119	11,67	25,72 °
	Cabeza	GP-GM	2,75	26,97	0,128	12,55	28,98 °

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.35 Análisis de talud 7



Fuente: Elaboración propia

3.5.8. Cálculo del F.S. talud 8.

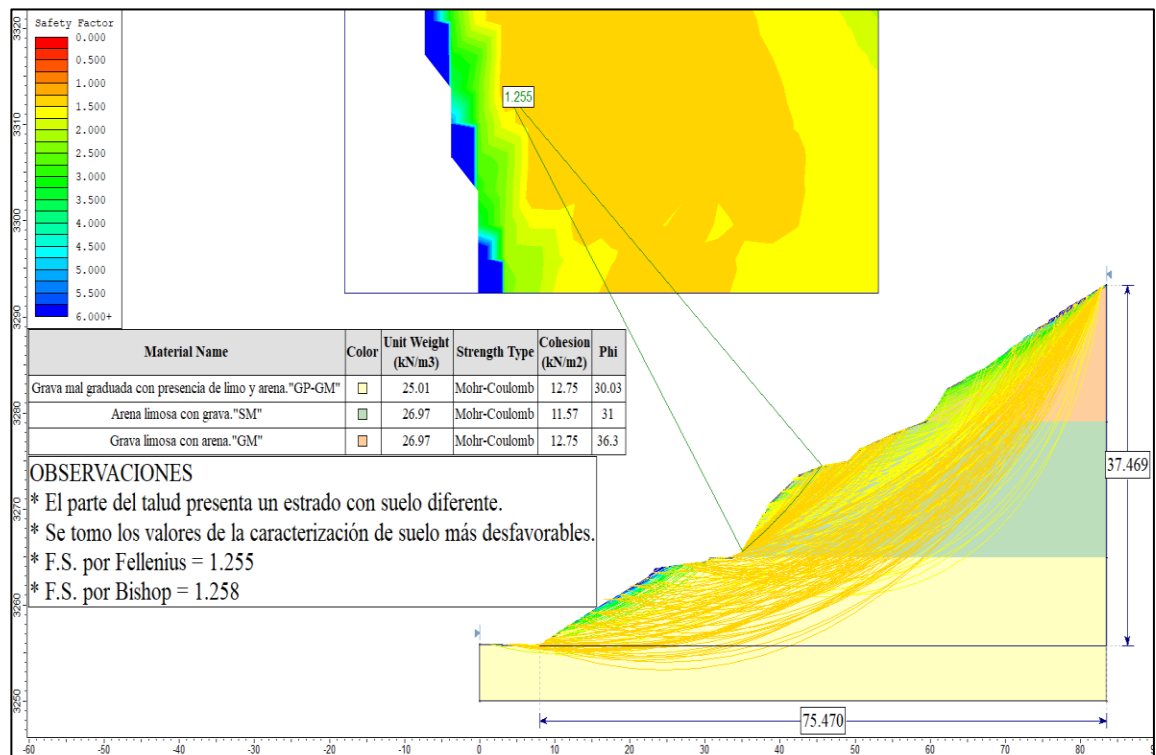
A continuación, se muestran los datos que son necesarios para realizar el cálculo del factor de seguridad del talud.

Tabla 3.29 Datos de talud 8

Talud	Parte del talud	Clasificación SUCS	Peso específico		Cohesión		Ángulo de fricción
			g/cm ³	KN/m ³	Kg/cm ²	KN/m ²	
Talud 8	Pie	GP-GM	2,55	25,01	0,130	12,75	30,03 °
	Cuerpo	SM	2,67	26,97	0,118	11,57	31,00 °
	Cabeza	GM	2,66	26,97	0,130	12,75	36,30 °

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.36 Análisis de talud 8



Fuente: Elaboración propia

3.5.9. Cálculo del F.S. talud 9.

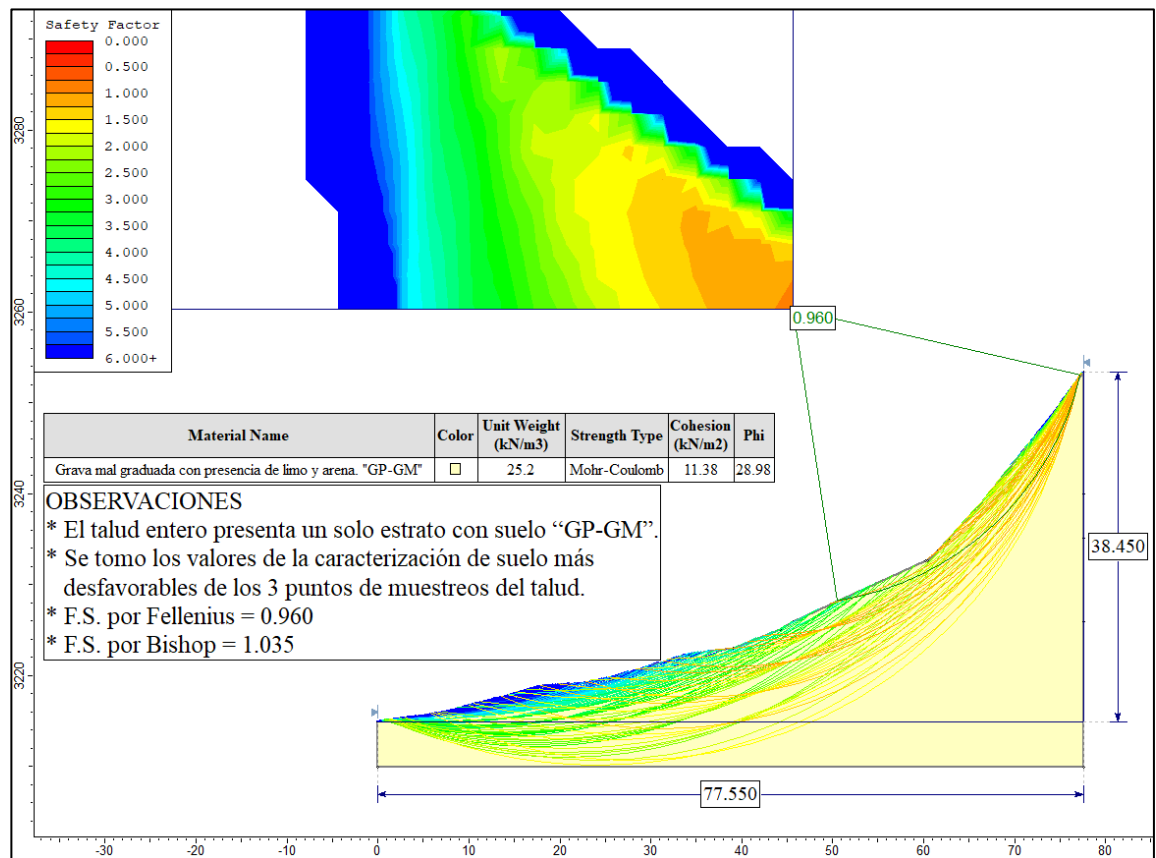
A continuación, se muestran los datos que son necesarios para realizar el cálculo del factor de seguridad del talud.

Tabla 3.30 Datos de talud 9

Talud	Parte del talud	Clasificación SUCS	Peso específico		Cohesión		Ángulo de fricción
			g/cm ³	KN/m ³	Kg/cm ²	KN/m ²	
Talud 9	Pie	GP-GM	2,58	25,30	0,116	11,38	28,98 °
	Cuerpo	GP-GM	2,59	25,40	0,119	11,67	30,29 °
	Cabeza	GP-GM	2,57	25,20	0,128	12,55	30,03 °

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.37 Análisis de talud 9



Fuente: Elaboración propia

3.5.10. Cálculo del F.S. talud 10.

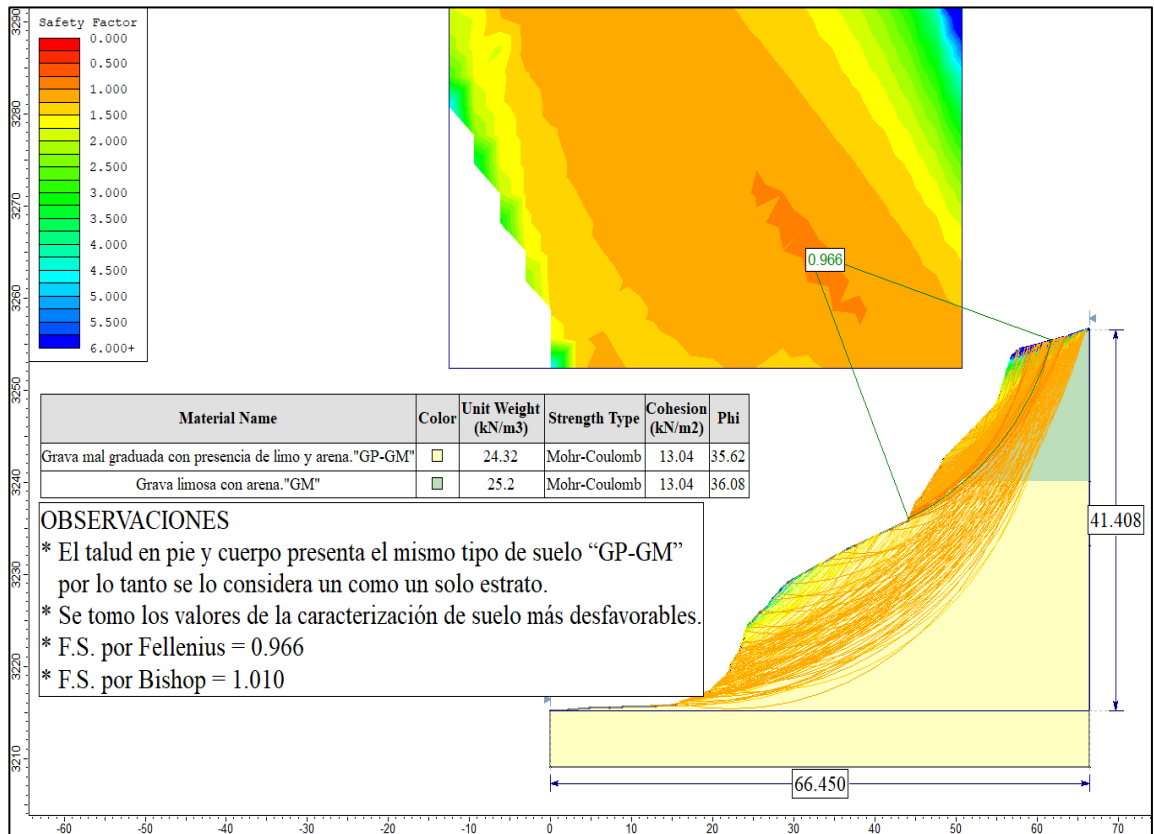
A continuación, se muestran los datos que son necesarios para realizar el cálculo del factor de seguridad del talud.

Tabla 3.31 Datos de talud 10

Talud	Parte del talud	Clasificación SUCS	Peso específico		Cohesión		Ángulo de fricción
			g/cm ³	KN/m ³	Kg/cm ²	KN/m ²	
Talud 10	Pie	GP-GM	2,58	25,30	0,138	13,53	29,38 °
	Cuerpo	GP-GM	2,48	24,32	0,133	13,04	35,62 °
	Cabeza	GM	2,57	25,20	0,133	13,04	36,08 °

Fuente: Elaboración propia

Figura 3.38 Análisis de talud 10



Fuente: Elaboración propia

Con los resultados obtenidos en laboratorio se procedió a realizar el análisis del factor de seguridad de cada talud con el programa Slide 6.0, sin alterar la geometría actual de los taludes, así se verificó el estado actual de los mismos.

Tabla 3.32 Factores de seguridad de las secciones actuales de los taludes

F.S. actual de los taludes				
Talud N°	F.S. Bishop simplificado	F.S. Fellenius	Condición actual	Observación
1	0,863	0,825	Inestable	Sección actual
2	0,942	0,908	Inestable	Sección actual
3	0,973	0,936	Inestable	Sección actual
4	0,910	0,854	Inestable	Sección actual
5	1,026	0,958	Inestable	Sección actual
6	0,818	0,790	Inestable	Sección actual
7	1,116	1,109	Inestable	Sección actual
8	1,258	1,255	Estable	Sección actual
9	1,035	0,960	Inestable	Sección actual
10	1,010	0,966	Inestable	Sección actual

Fuente: Elaboración propia

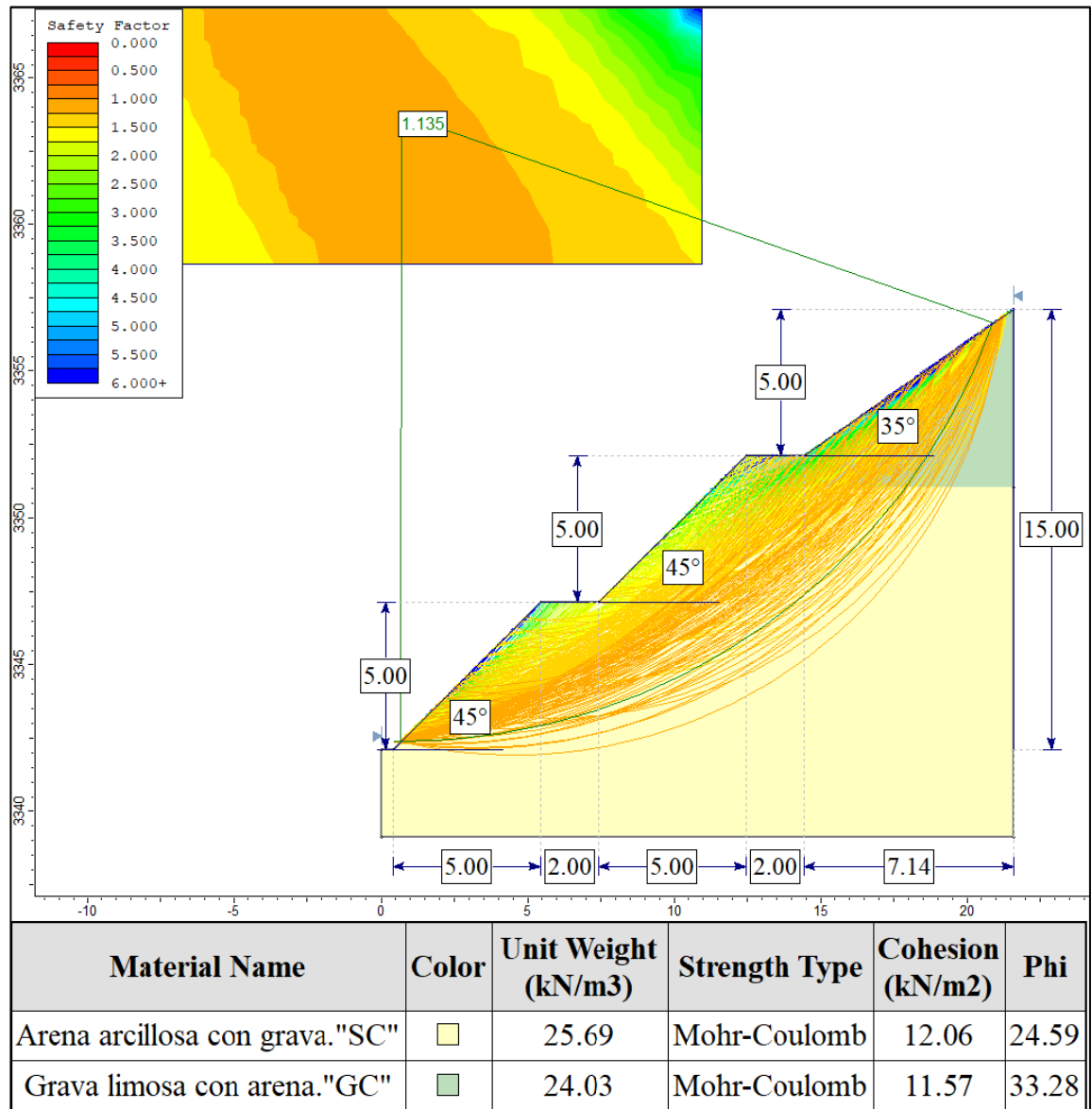
Como se puede observar en la tabla de resultados del cálculo del factor de seguridad de las secciones actuales de los taludes podemos verificar que en su gran mayoría son inestables puesto que el factor de seguridad es menor a 1,20 y debido a eso se pueden presentar diferentes tipos de fallas.

3.6. MODIFICACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS TALUDES – ALTERNATIVA 1.

Para la alternativa de estabilización de taludes, se optó por la modificación de la geometría para ello se procedió a modificar el perfil de los taludes, en este análisis se tomaron varios factores para lograr su estabilidad de cada talud: cambio de pendiente del talud, remoción de materiales de la cabecera y banquetas intermedias o terraceo, tomando en cuenta procesos constructivos y la optimización de poder determinar un factor de seguridad estable.

3.6.1. Modificación geométrica talud 1.

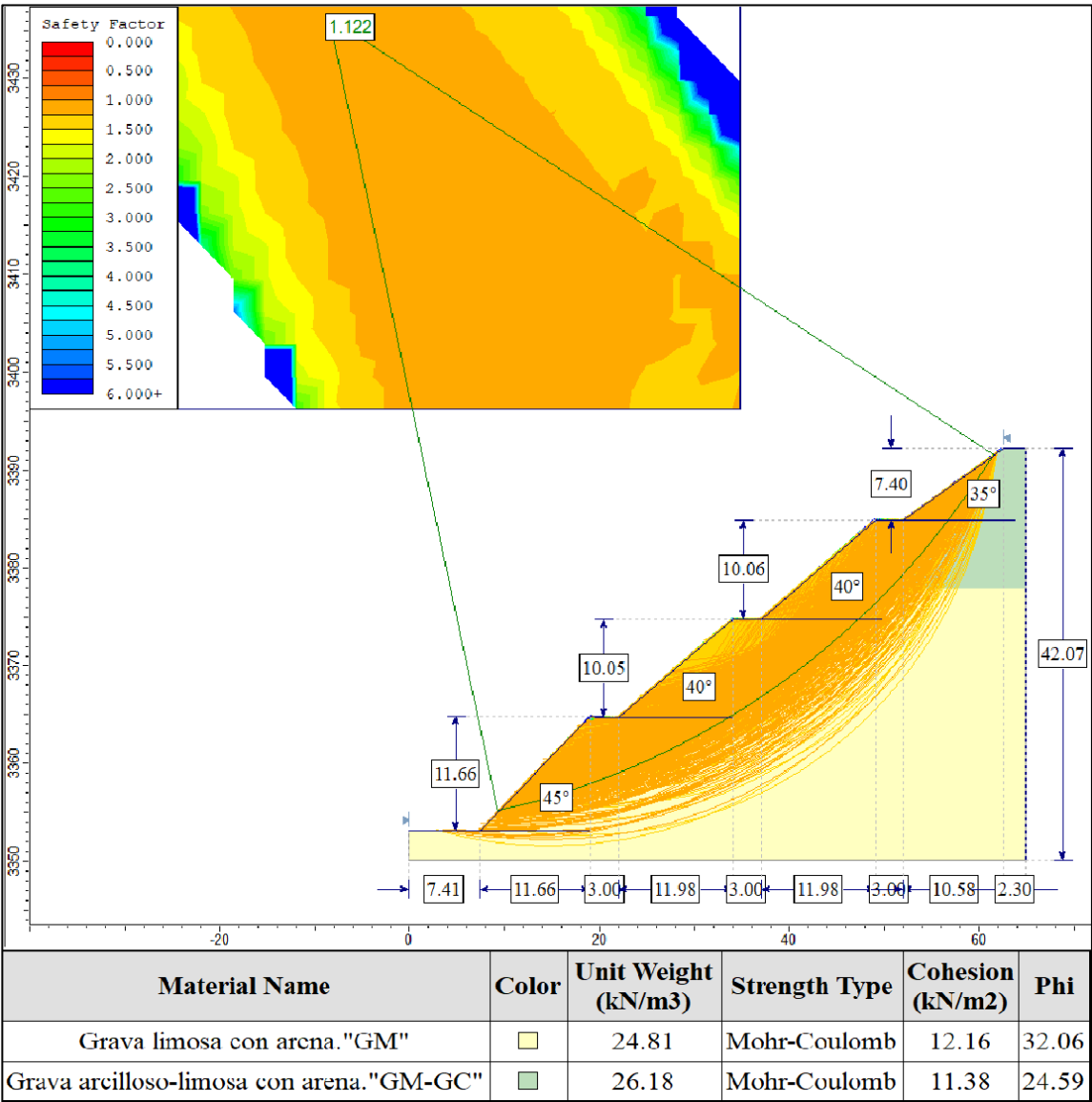
Figura 3.39 Análisis de nueva sección talud 1



Fuente: Elaboración propia

3.6.2. Modificación geométrica talud 2.

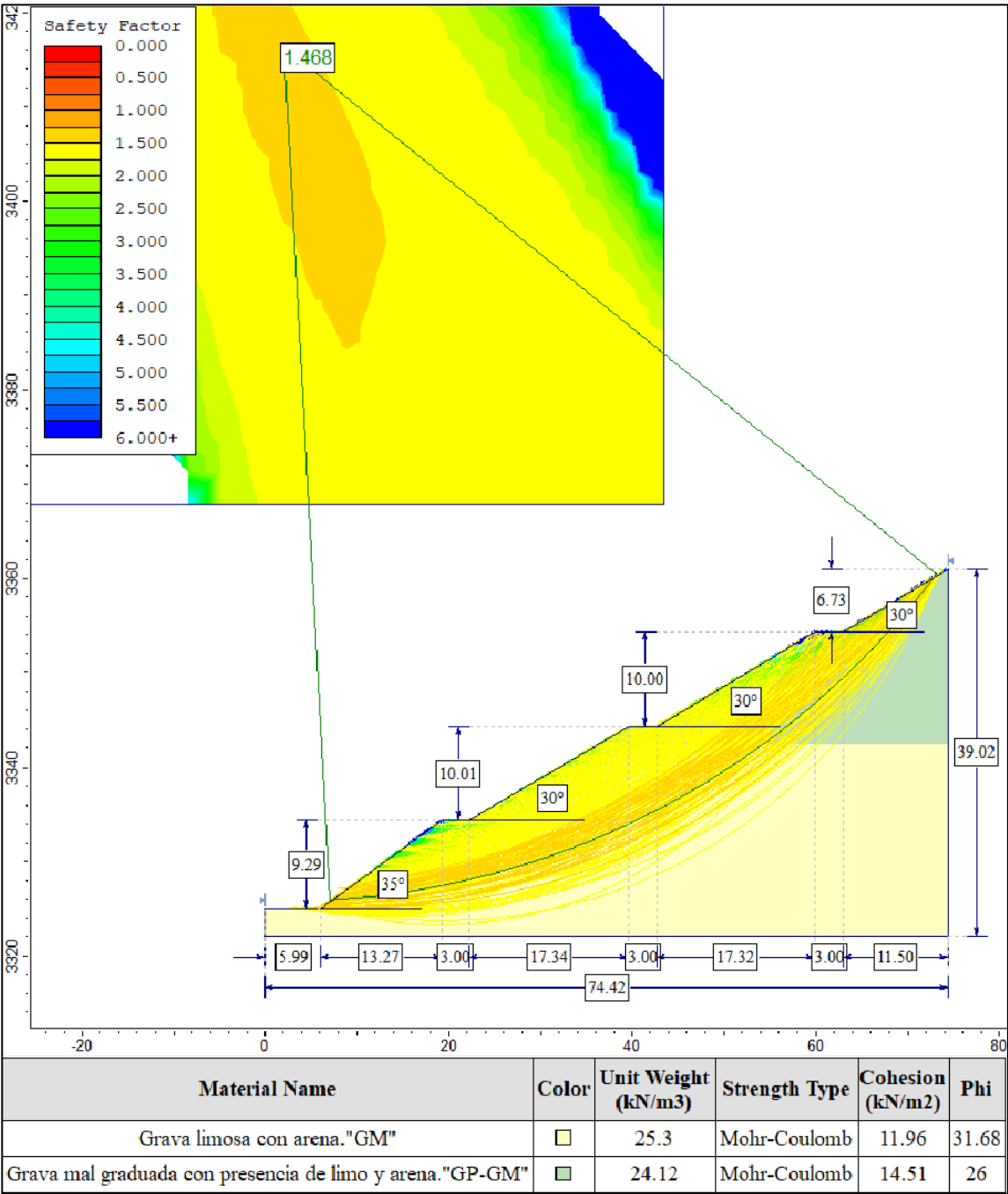
Figura 3.40 Análisis de nueva sección talud 2



Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Modificación geométrica talud 3.

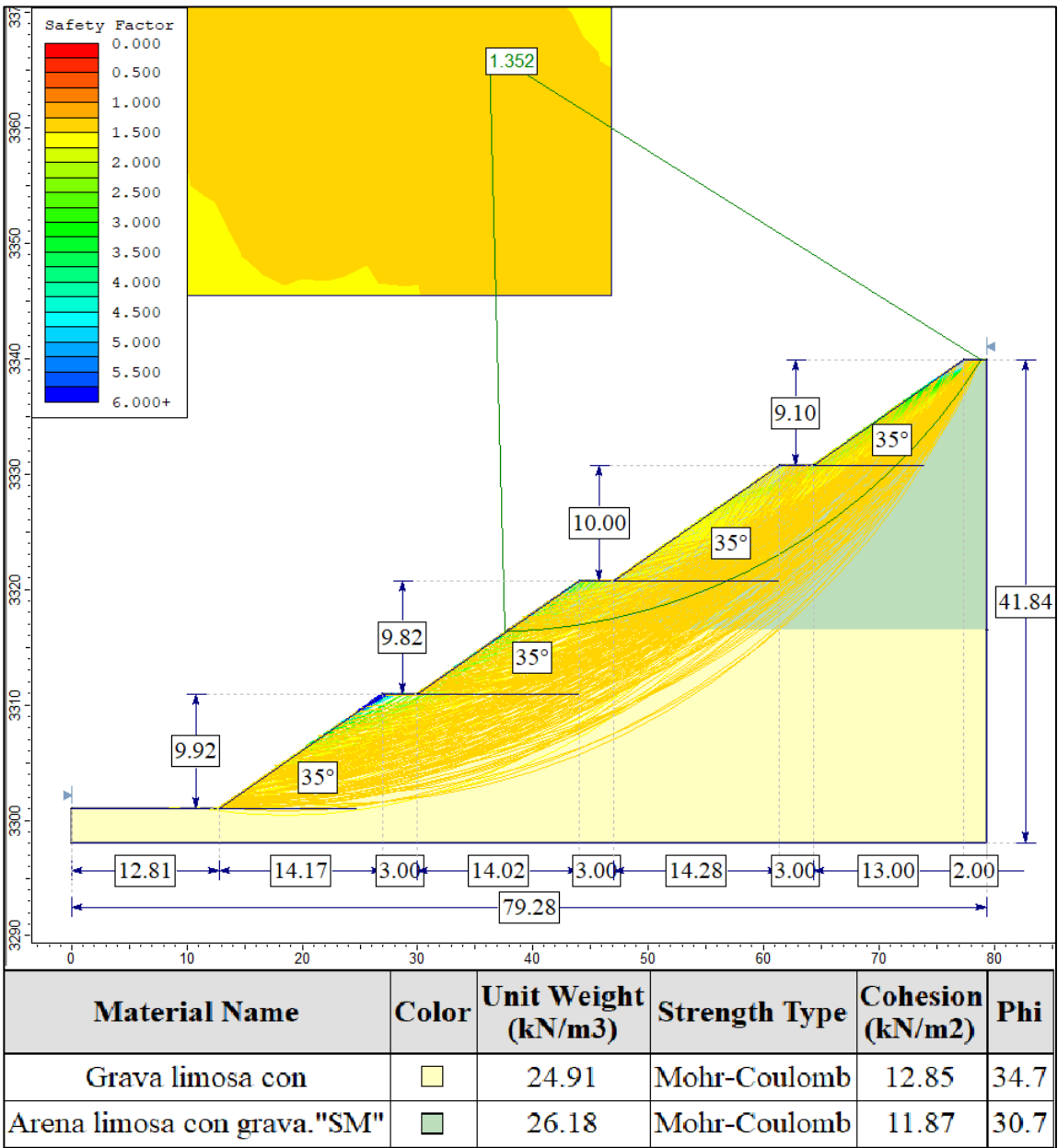
Figura 3.41 Análisis de nueva sección talud 3



Fuente: Elaboración propia

3.6.4. Modificación geométrica talud 4.

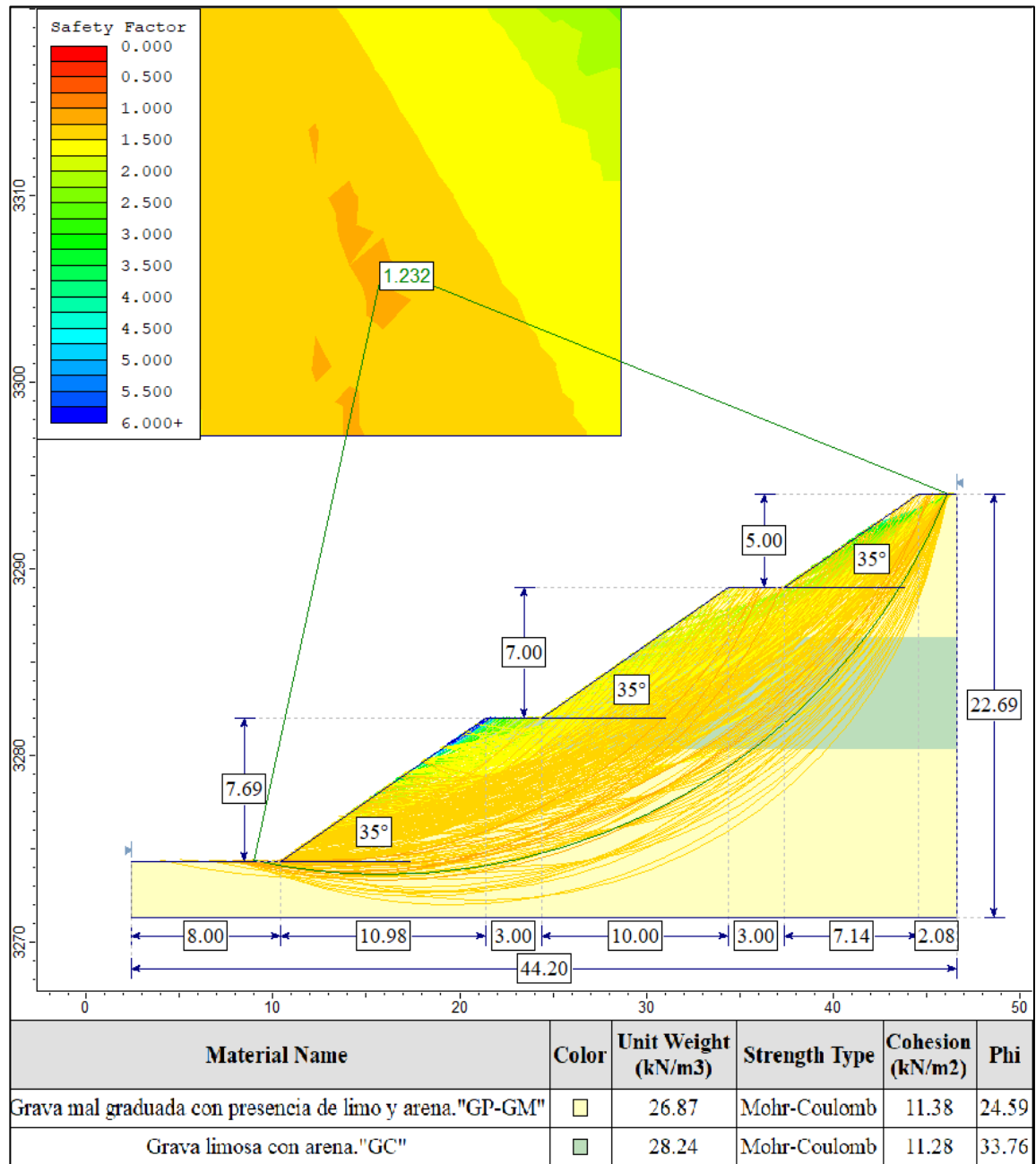
Figura 3.42 Análisis de nueva sección talud 4



Fuente: Elaboración propia

3.6.5. Modificación geométrica talud 5.

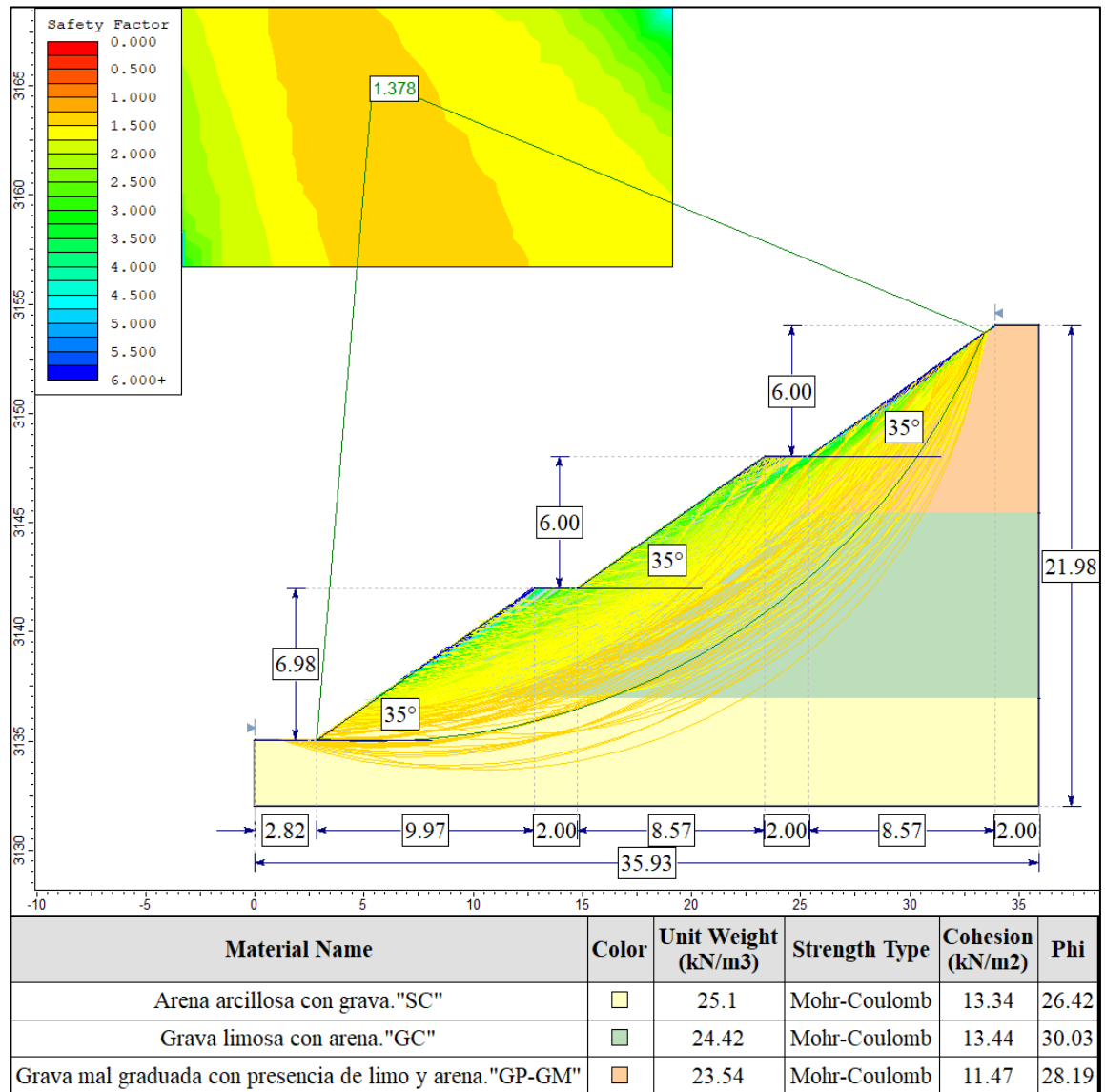
Figura 3.43 Análisis de nueva sección talud 5



Fuente: Elaboración propia

3.6.6. Modificación geométrica talud 6.

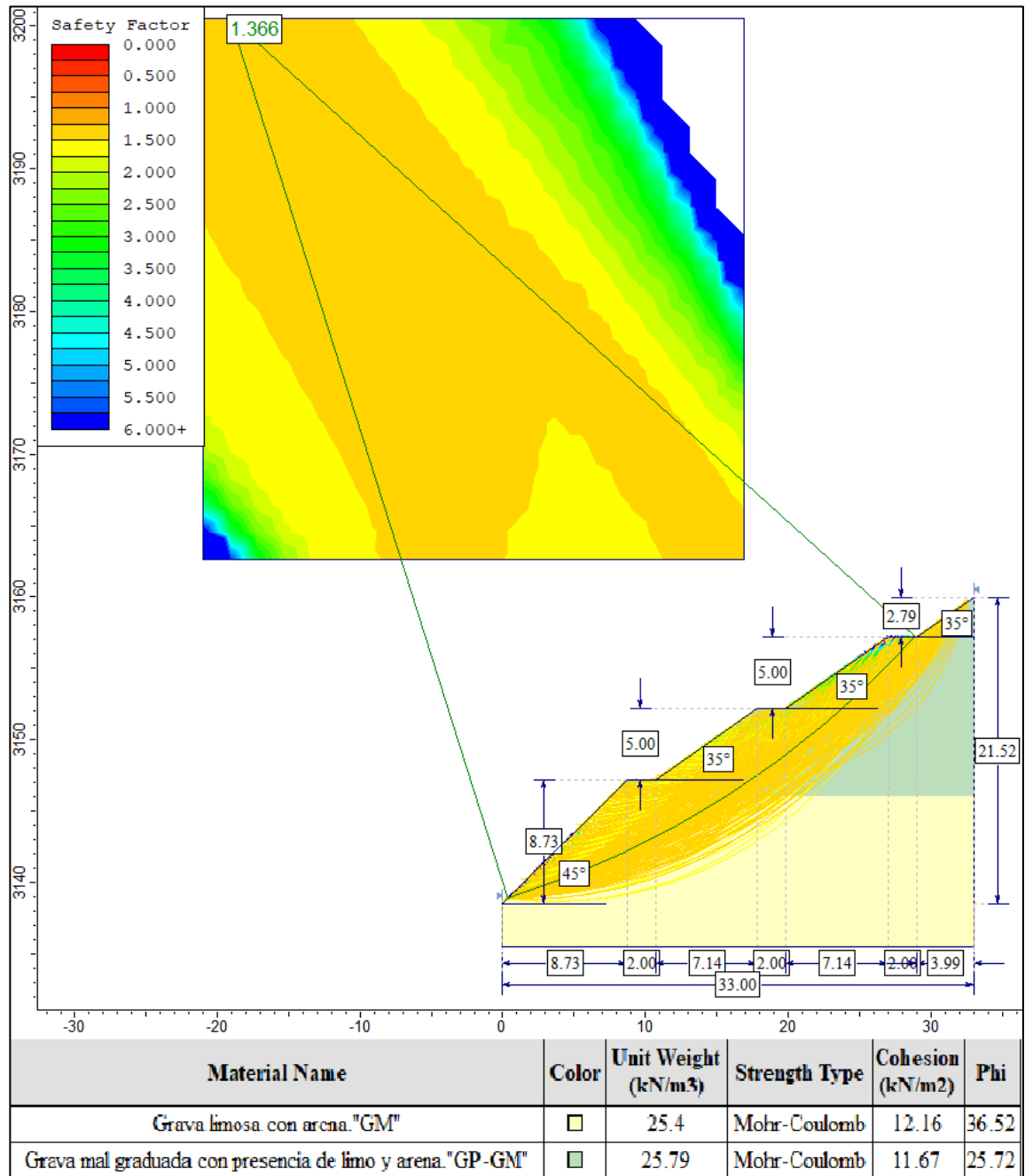
Figura 3.44 Análisis de nueva sección talud 6



Fuente: Elaboración propia

3.6.7. Modificación geométrica talud 7.

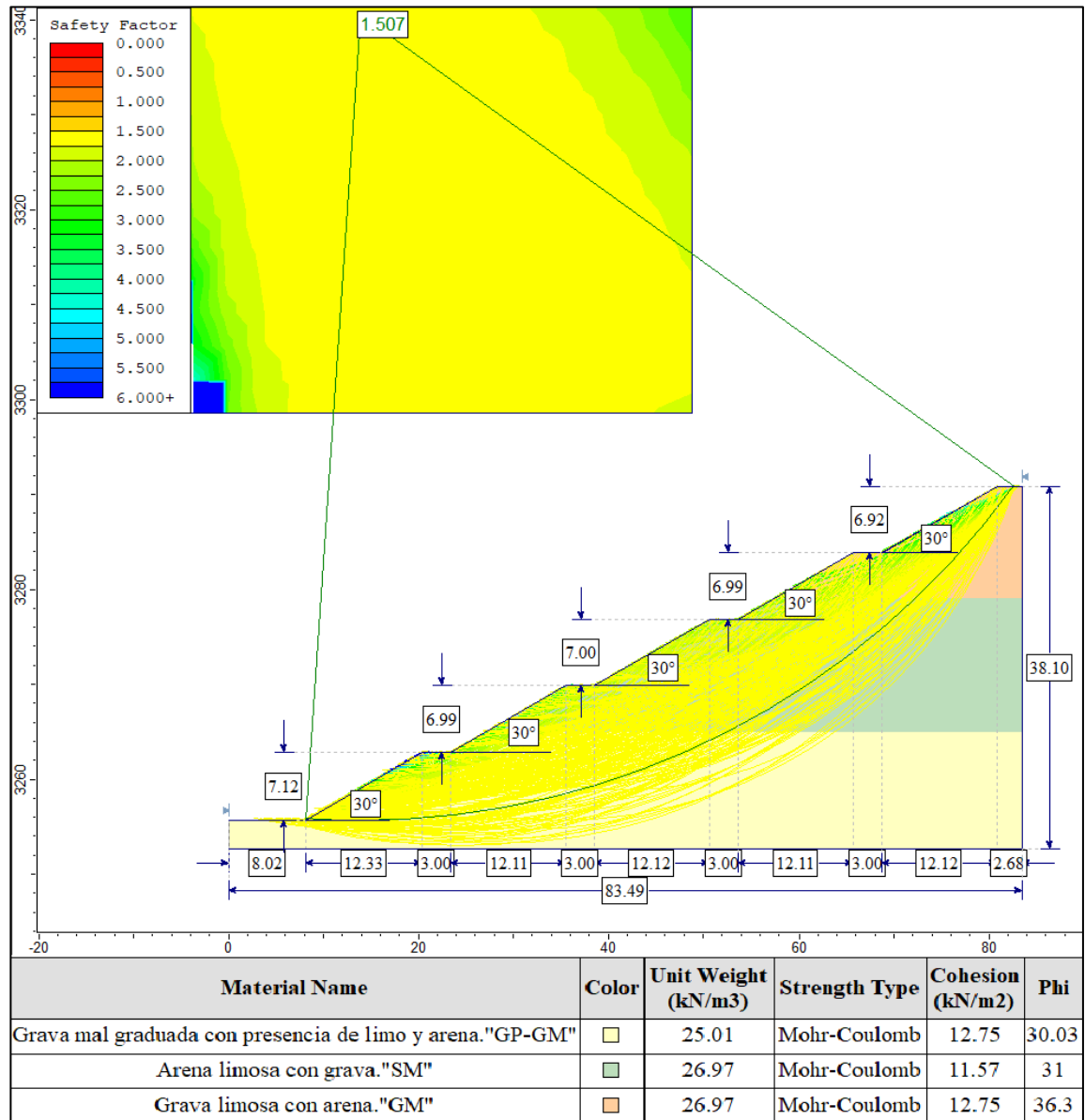
Figura 3.45 Análisis de nueva sección talud 7



Fuente: Elaboración propia

3.6.8. Modificación geométrica talud 8.

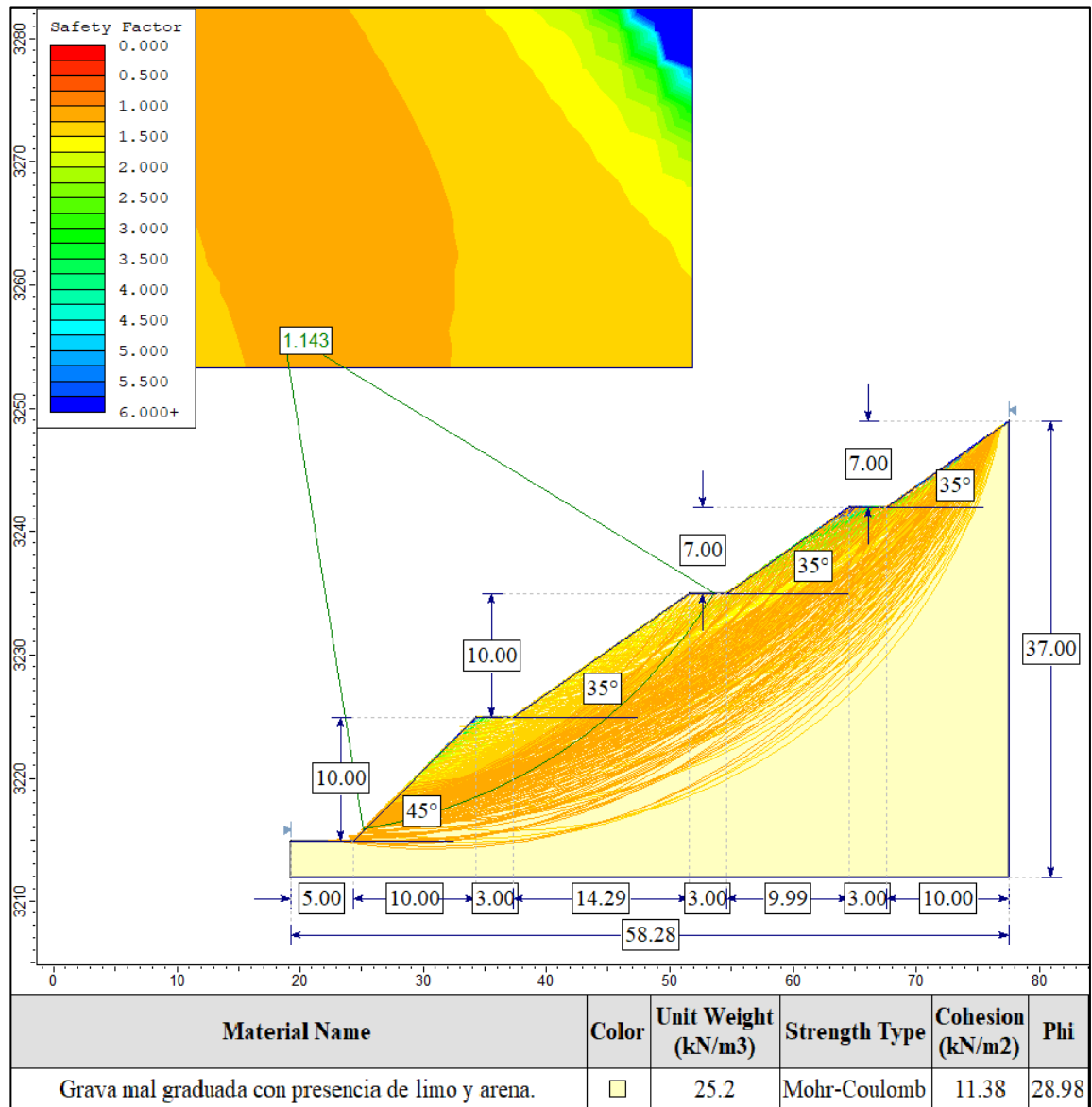
Figura 3.46 Análisis de nueva sección talud 8



Fuente: Elaboración propia

3.6.9. Modificación geométrica talud 9.

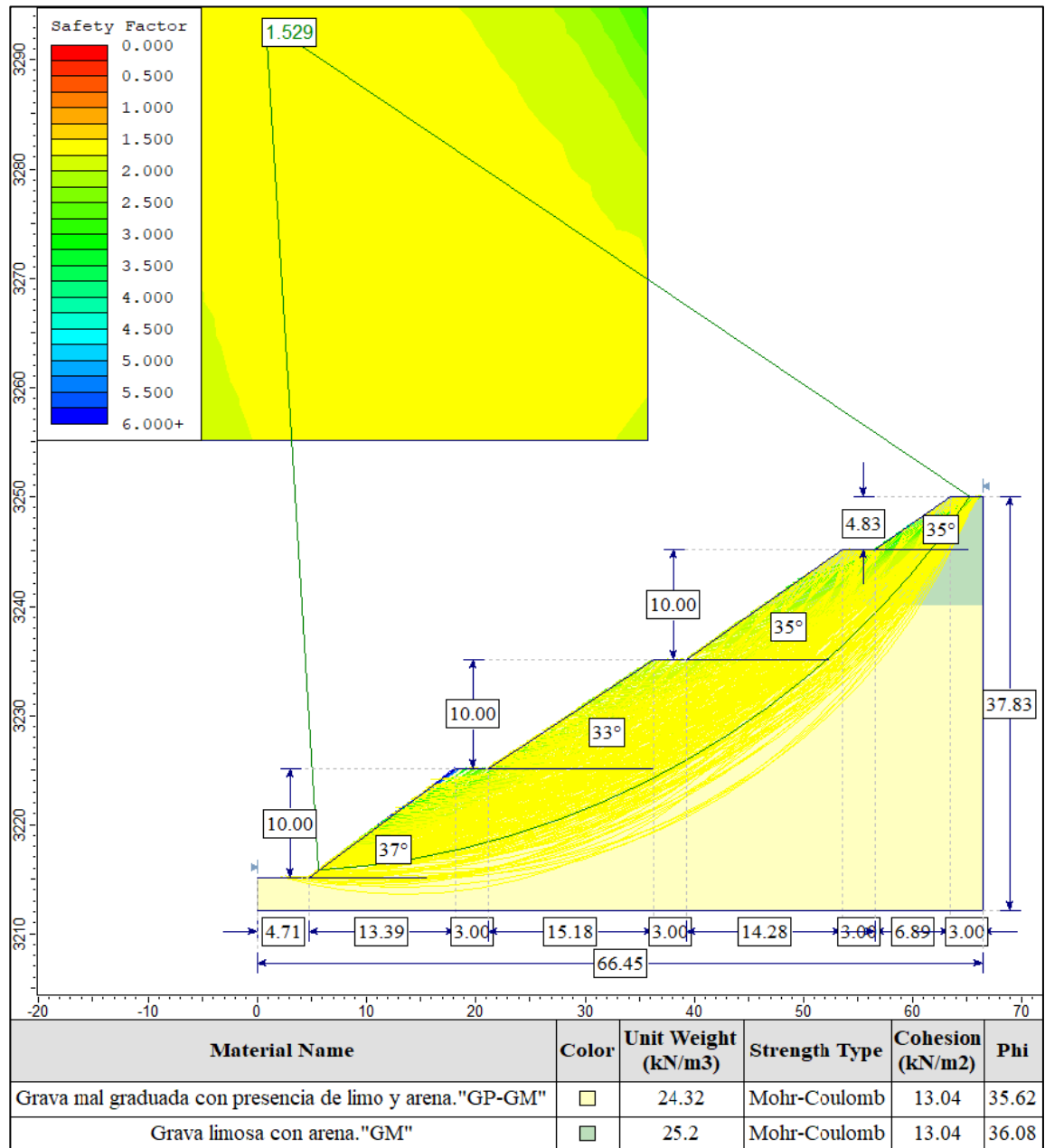
Figura 3.47 Análisis de nueva sección talud 9



Fuente: Elaboración propia

3.6.10. Modificación geométrica talud 10.

Figura 3.48 Análisis de nueva sección talud 10



Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.33 Factores de seguridad con cambio de la geometría de los taludes

F.S. Con cambio geométrico				
Talud N°	F.S. Bishop simplificado	F.S. Fellenius	Condición mejorada	Observación
1	1,188	1,135	Inestable	Mod. Geométrica
2	1,159	1,122	Inestable	Mod. Geométrica
3	1,505	1,468	Estable	Mod. Geométrica
4	1,401	1,352	Estable	Mod. Geométrica
5	1,314	1,232	Estable	Mod. Geométrica
6	1,475	1,378	Estable	Mod. Geométrica
7	1,374	1,366	Estable	Mod. Geométrica
8	1,581	1,507	Estable	Mod. Geométrica
9	1,190	1,143	Inestable	Mod. Geométrica
10	1,588	1,529	Estable	Mod. Geométrica

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla anterior de resultados del cálculo del factor de seguridad con modificación de la geometría de los taludes, podemos verificar que en su gran mayoría los taludes luego de modificar su geometría son estables, puesto que el factor de seguridad es mayor a 1,20.

Para los taludes que presentan un F.S. estable mayor a 1.20 ya no se realiza la implantación de la geomalla reforzada.

3.7. TALUDES CON IMPLEMENTACIÓN DE GEOMALLA REFORZADA – ALTERNATIVA 2.

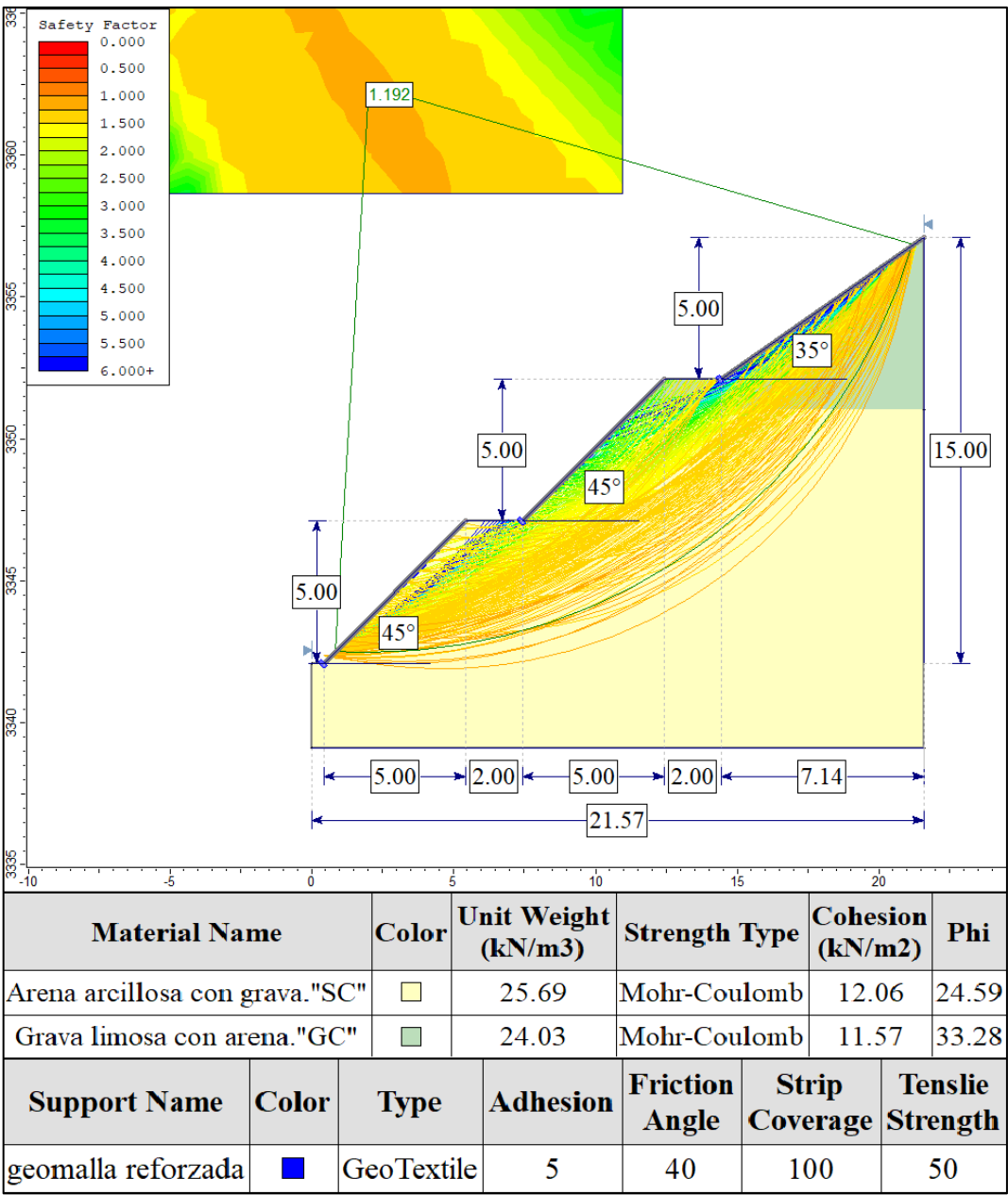
Como segunda alternativa de solución se propone implementación de geomalla reforzada MacMat R1 por su alta viabilidad técnica en la ejecución de taludes, las ventajas de la geomalla a taludes como elemento de refuerzo garantizan la seguridad con un costo de mantenimiento casi nulo.

- **MacMat R1:** Este es un geotextil que combina una estructura de malla con una capa de material biodegradable. Se utiliza principalmente para la estabilización de

taludes y la protección de suelos, ayudando a prevenir la erosión y promoviendo el crecimiento de vegetación.

3.7.1. Implementación de geomalla reforzada talud 1

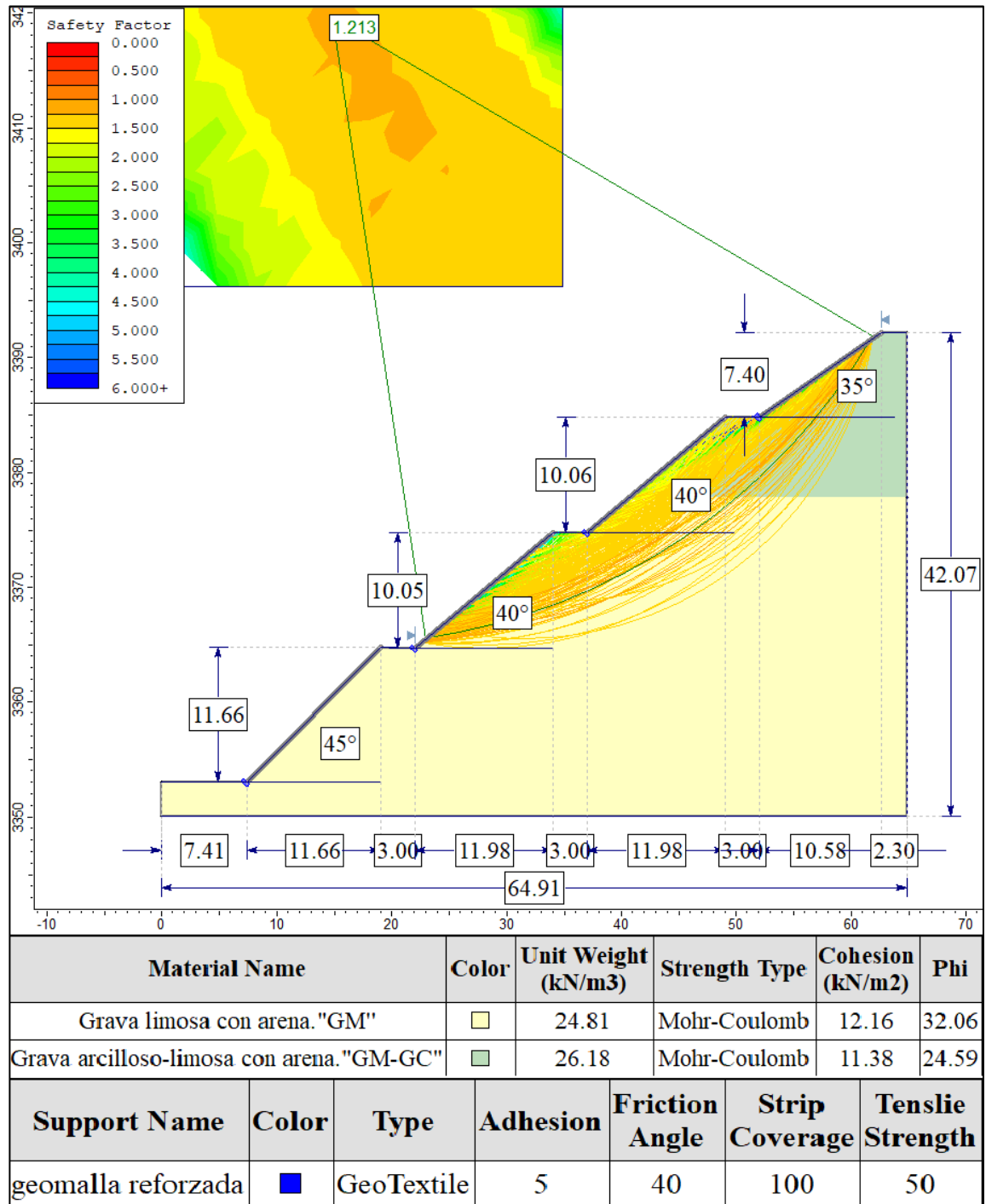
Figura 3.49 Análisis de implementación de geomalla talud 1



Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Implementación de geomalla reforzada talud 2

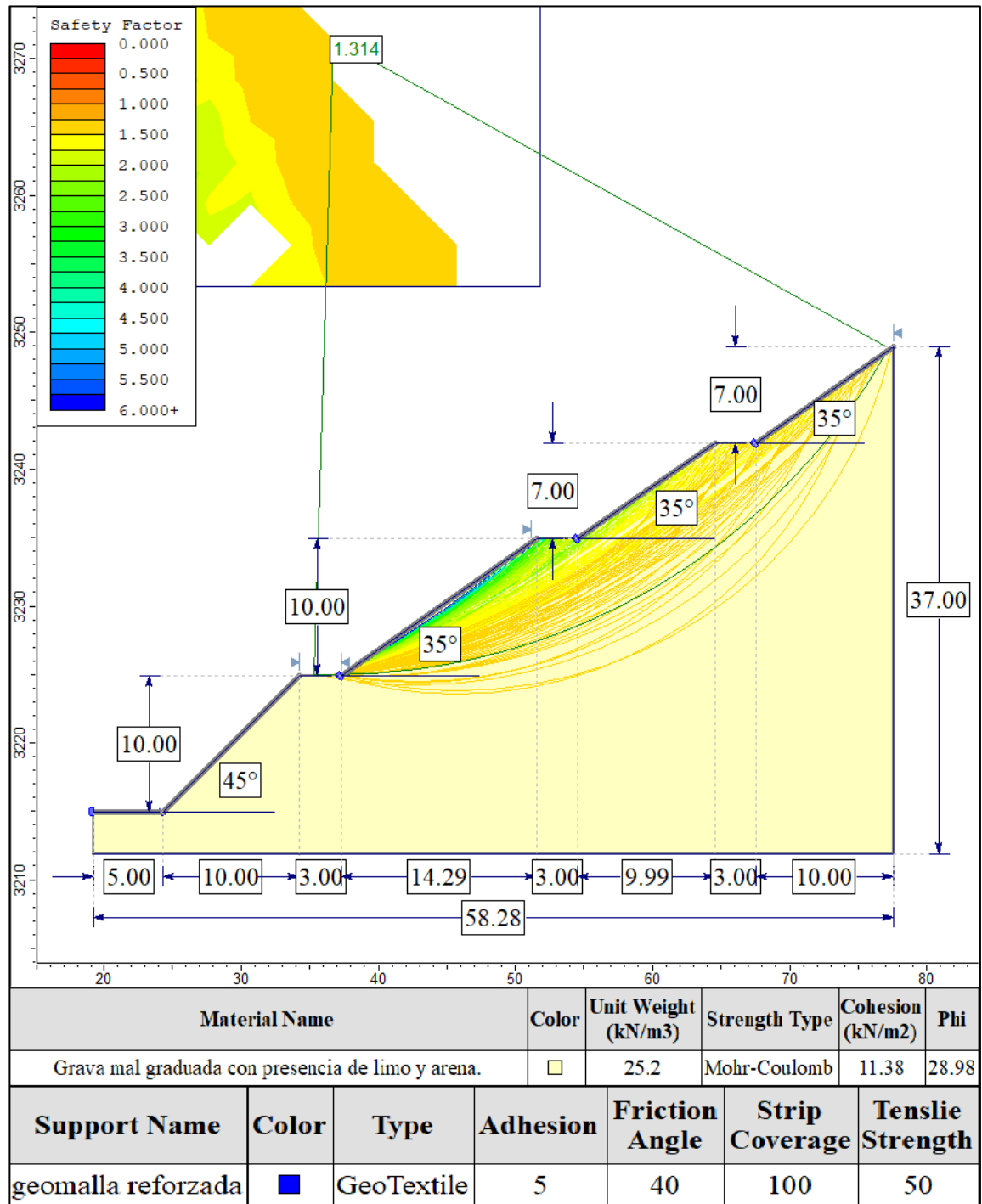
Figura 3.50 Análisis de implementación de geomalla talud 2



Fuente: Elaboración propia

3.7.3. Implementación de geomalla reforzada talud 9

Figura 3.51 Análisis de implementación de geomalla talud 9



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.52 Factores de seguridad con implementación de geomalla reforzada

F.S. Cambio geométrico y geotextil				
Talud N°	F.S. Bishop simplificado	F.S. Fellenius	Condición definitiva	Observación
1	1,271	1,192	Estable	Malla reforzada
2	1,259	1,213	Estable	Malla reforzada
9	1,383	1,314	Estable	Malla reforzada

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la tabla anterior de resultados del cálculo, factor de seguridad con modificación de la geometría e implementación de geomalla reforzada en los taludes, podemos verificar que los taludes que seguían siendo inestables luego de su modificación geométrica pasan a ser estables luego de implementar la geomalla reforzada.

Tabla 3.34 Presupuesto general Geomalla reforzada

Proyecto: "Evaluación del F.S. en taludes por método de dovelas en la Falda La Queñua"					
Tramo: Cochabamba - Falda La Queñua					
Lugar: Provincia Méndez					
Tipo de cambio: 6.96					
Talud N°	Descripción	Und.	Cantidad	Unitario	Parcial (Bs)
1	Malla MacMat® R1	m²	437,03	382,19	167.028,78
2	Malla MacMat® R1	m²	2.700,44	382,19	1.032.082,92
9	Malla MacMat® R1	m²	1.780,49	382,19	680.486,63
Total presupuesto:					1.879.598,32
Son: Un Millón ochocientos setenta y nueve mil quinientos noventa y ocho con 32/100 bolivianos					

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES.

- Se identificaron que los taludes con menor F.S. son los Taludes 1, 2, 4, 6 y 9 los taludes con mayor F.S son 3, 5, 7, 8 y 10.
- El análisis de las características geotécnicas del suelo fue fundamental para establecer las propiedades físico-mecánicas de cada talud.
- El uso del software Slide fue fundamental en el análisis, ya que permitió considerar todas las características críticas de los taludes, como altura, inclinación, estratos, lo que facilitó el análisis.
- De no estabilizarse los taludes, la carretera que conecta Tarija con el norte de Bolivia corre el riesgo de quedar bloqueada por deslizamientos, lo que afectaría no solo el flujo vehicular, sino también la economía regional y la seguridad pública.
- La modificación geométrica de los taludes, junto con la implementación de terrazas y geomallas, resultó ser una solución viable para mejorar la estabilidad de los taludes. Al reducir la pendiente y modificar la geometría, se puede aumentar el factor de seguridad de los taludes, mitigando el riesgo de fallas estructurales.

4.2. RECOMENDACIONES.

- Se recomienda el uso de este software (Slide), para el cálculo de estabilidad de taludes, debido a que éste considera todas las características del talud como ser altura, inclinación, diferentes estratos, perfil del talud y todas las fuerzas actuantes en la dovela.
- En cuanto al uso de equipos de seguridad para realizar la medición y levantamiento topográfico en campo contar con la indumentaria adecuada.

- Al momento de realizar la toma de muestras, se deberá ser muy preciso y cuidadoso para realizar una extracción adecuada, así mismo se debe contar con colaboradores necesarios para la protección, para así no contaminar o evitar pérdida de material.
- Se recomienda la implementación de geomallas reforzadas en los taludes que presentan factores de seguridad por debajo del mínimo requerido. Esta técnica ha demostrado ser eficaz en estabilizar taludes que no logran mantenerse estables sólo con modificaciones geométricas.
- Dado que los taludes son propensos a cambios debido a condiciones climáticas, es esencial realizar un monitoreo periódico de las condiciones de estabilidad de los taludes. Este monitoreo debe incluir el control las condiciones del terreno y la efectividad de las geomallas instaladas.
- Se recomienda realizar ajustes geométricos en los taludes con inclinaciones pronunciadas. Al modificar la pendiente y crear banquetas o terrazas, se puede reducir la carga sobre el talud y aumentar su estabilidad.
- Se sugiere implementar un plan de mantenimiento periódico para los taludes. El mantenimiento preventivo ayudará a reducir los riesgos de fallos en el futuro.