



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POST-DESLIZAMIENTO POR MEDIO DE
MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE LA LADERA DEL CERRO
CASUAL DEL CANTÓN ALAUSÍ PROVINCIA DE CHIMBORAZO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero e Ingeniera Civil

AUTORES: Jefferson Fernando Cueva Yacelga
Teresa Carolina Pilaluisa Coronel

TUTOR: Freddy Israel Rodriguez Badillo

Quito - Ecuador
2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jefferson Fernando Cueva Yacelga con documento de identificación N° 1725512493 y Teresa Carolina Pilaluisa Coronel con documento de identificación N° 1725412876; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación

Quito, 4 de agosto del 2025

Atentamente,



Jefferson Fernando Cueva Yacelga
1725512493



Teresa Carolina Pilaluisa Coronel
1725412876

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Jefferson Fernando Cueva Yacelga con documento de identificación N° 1725512493 y Teresa Carolina Pilaluisa Coronel con documento de identificación N° 1725412876 expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto de Investigación: “Análisis de estabilidad Post-deslizamiento por medio de modelación numérica tridimensional de la ladera del cerro casual del Cantón Alausí provincia de Chimborazo” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero e Ingeniera Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 4 de agosto del 2025

Atentamente,



Jefferson Fernando Cueva Yacelga

1725512493



Teresa Carolina Pilaluisa Coronel

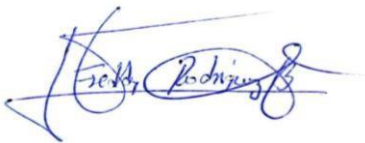
1725412876

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Freddy Israel Rodríguez Badillo con documento de identificación N° 1720094026, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POST-DESLIZAMIENTO POR MEDIO DE MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE LA LADERA DEL CERRO CASUAL DEL CANTÓN ALAUSÍ PROVINCIA DE CHIMBORAZO, realizado por Jefferson Fernando Cueva Yacelga con documento de identificación N° 1725512493 y Teresa Carolina Pilaluisa Coronel con documento de identificación N° 1725412876, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto de Investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 4 de agosto del 2025

Atentamente,



Ing. Freddy Israel Rodríguez Badillo, MSc
1720094026

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POST-DESLIZAMIENTO POR MEDIO DE MODELACIÓN NUMÉRICA TRIDIMENSIONAL DE LA LADERA DEL CERRO CASUAL DEL CANTÓN ALAUSÍ PROVINCIA DE CHIMBORAZO

ANALYSIS OF POST-SLIDE STABILITY BY MEANS OF THREE-DIMENSIONAL NUMERICAL MODELING OF THE SLOPE OF THE CASUAL HILL IN ALAUSÍ CANTON, PROVINCE OF CHIMBORAZO

Fernando Cueva-Yacelga¹, Carolina Pilaluisa-Coronel²

Resumen

El deslizamiento ocurrido el 26 de marzo de 2023 en el Cantón Alausí causó varias pérdidas tanto humanas como materiales que afectaron a toda la población. Esta investigación tiene como objeto analizar la estabilidad actual del cerro Casual, ante la posibilidad de un nuevo deslizamiento, mediante modelación numérica tridimensional con el uso del software MIDAS GTS NX.

Esta investigación partió de la recopilación de datos geológicos y geotécnicos, que mediante el uso de correlaciones se realizaron los cálculos para determinar parámetros geo mecánicos del suelo como: el módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, cohesión, ángulo de fricción y peso específico. Este proceso fue importante en la investigación ya que para la calibración del modelo se realizó un retro análisis reduciendo la cohesión y el ángulo de fricción interna mediante correlaciones que involucran el incremento de humedad. Con estos parámetros se desarrollaron los modelos numéricos tridimensionales de elementos finitos antes y después del deslizamiento, esta herramienta avanzada permitió modelar el cerro Casual con precisión en la zona de estudio, además de considerar todos los fenómenos físicos que intervienen en la zona afectada; dichos modelos involucraron el estudio de redes de flujo permanente (steady-state) para conocer las

Abstract

The landslide that occurred on March 26, 2023, in the Alausí Canton caused significant human and material losses, affecting the entire population. This study aims to analyze the current stability of Cerro Casual in light of the potential for a new landslide, using three-dimensional numerical modeling through the MIDAS GTS NX software.

The research began with the collection of geological and geotechnical data. Using empirical correlations, geomechanical soil parameters were estimated, including elastic modulus, Poisson's ratio, cohesion, internal friction angle, and unit weight. This process was essential, as a back-analysis was conducted to calibrate the model by reducing cohesion and internal friction angle through correlations that consider the increase in soil moisture.

With these parameters, 3D finite element numerical models were developed for the conditions before and after the landslide. This advanced modeling tool enabled precise simulation of Cerro Casual within the study area, considering all physical phenomena present in the affected zone. The models included steady-state seepage analyses to estimate pore water pressures. Additionally, the Strength Reduction Method (SRM) was applied to identify the potential failure mechanism and determine a safety factor that closely reflects real site conditions.

Finally, a pseudo-static analysis was performed to

¹ Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador

² Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana - Quito, Ecuador

Autor correspondencia: jfercho1094@outlook.com; carolina_pilaluisa@hotmail.com

presiones de poro, el método de estabilidad para elementos finitos (SRM) permitió generar la forma de falla 3D y proporcionar un factor de seguridad del sitio lo más cercano a la realidad.

Finalmente se realizó un análisis pseudoestático para evaluar la estabilidad del talud frente a la probabilidad de eventos sísmicos, este estudio fue de suma importancia para determinar el factor de seguridad y así conocer las condiciones actuales de estabilidad para recomendar medidas de control que alerten a la población para evitar otra catástrofe.

Palabras Clave: Talud, Factor de seguridad, Estabilidad, Modelo 3D, Análisis, red de flujo, presión de poro, elementos finitos.

evaluate slope stability under potential seismic events. This assessment was critical to determine the safety factor under dynamic conditions and to understand the current slope stability, providing the basis for recommending control measures to warn the population and prevent another disaster.

Keywords: Slope, Factor of safety, Stability, Model 3D, Analysis, flow network, pore pressure, finite elements.

1. Introducción

Ecuador se ubica en una zona con alto índice de desastres naturales como deslizamientos, sismos y erupciones volcánicas que afectan a gran parte de la población.

El 26 de marzo de 2023 es una fecha que perdura en todos los habitantes del cantón Alausí, ya que se registró un movimiento de tierra considerado como una de las desgracias de mayor magnitud registradas en la historia del cantón. Este movimiento de tierra afectó un área de 24.3 hectáreas que incluyen viviendas, vías de acceso y la destrucción de seis barrios [15].

Este evento produjo un deslizamiento rotacional [13], este tipo de deslizamientos generan un tipo de movimiento de masa donde una porción de suelo se desplaza ladera abajo a lo largo de una superficie circular, este tipo de desplazamiento se considera extremadamente rápido formando un escarpe en la parte superior del talud, este fenómeno se presenta en lugares con pendientes pronunciadas, precipitaciones intensas o en casos de alteración de las propiedades resistentes del terreno causadas por actividades antrópicas que aumenta la probabilidad de ocurrencia de un deslizamiento.

Se analizó los datos de estudios geológicos y geofísicos realizados en el sector del deslizamiento, clasificando los datos importantes e interpretando cada uno de ellos para llevar a cabo una modelación numérica tridimensional enfocada en las redes de flujo del cerro Casual antes y después del deslizamiento.

Esta investigación permitió entender el comportamiento del terreno deslizado mediante una simulación basada en elementos finitos; Se realizó el análisis de estabilidad partiendo de la estimación de parámetros geo mecánicos resistentes (cohesión y ángulo de fricción) por medio de correlaciones a partir de geofísica y un retro análisis de estabilidad.

Una vez obtenidos los parámetros geo mecánicos calibrados se realizó un modelo numérico tridimensional en MIDAS GTS NX. A partir del modelo numérico tridimensional se determinó las condiciones de presión de poro y un

factor de seguridad que permite conocer las condiciones actuales de estabilidad del cerro Casual.

2. Materiales y Métodos

2.1. Información Geológica

Alausí está situado en la zona sur de la cordillera de los Andes del Ecuador. La zona presenta una geología compleja, el sustrato litológico donde se asienta el cantón Alausí está constituido por rocas volcánicas, depósitos piroclásticos y rocas volcano-sedimentarias, correspondientes a formaciones geológicas miocénicas a cuaternarias [1].

Hacia Tixán y en el margen Occidental, se presenta una estructura cónica invertida, que añadiéndose la actividad volcánica ha hecho suponer que se tratase de un antiguo cráter [1]. En la figura 1 se presentan rocas eocénicas y oligocenas correspondientes a la formación Cisarán (MCs-Aa) al oeste y este. Sobreyacen depósitos volcanoclásticos y depósitos cuaternarios como: Movimientos en Masa (Qd), Deposito Coluvio-Aluvional (QCa), depósitos coluviales (QC) [1].

Sobre el basamento se encuentran depósitos laháríticos sobre la corona de deslizamiento. Su composición es de clastos angulosos a subangulosos, homogéneos, con una distribución caótica, con mala gradación. Dentro de estos horizontes de lahar se pueden observar avalanchas de escombros se presentan en menor área por encima de la corona del movimiento de masa específicamente en el sector de Casual [1]. En la margen del talud izquierdo de deslizamiento se compone de andesita y presenta polvo de rocas.

También existen avalanchas de escombros, que se presentan en forma de lentes alrededor del área de estudio en el sector de Casual. Toda esta secuencia se encuentra sobreyacidas por depósitos cuaternarios tipo coluvial y por depósitos de tobas retrabajadas de color café, de la Formación Cangahua. La Formación Cangahua contiene esporádicos lentes de conglomerados y bloques métricos de andesíticas y dacitas subangulares [1].

El deslizamiento ocurrido en la zona ha modificado el orden original de su geología, mezclando materiales actuales y antiguos esto genera que la zona sea compleja de interpretar.

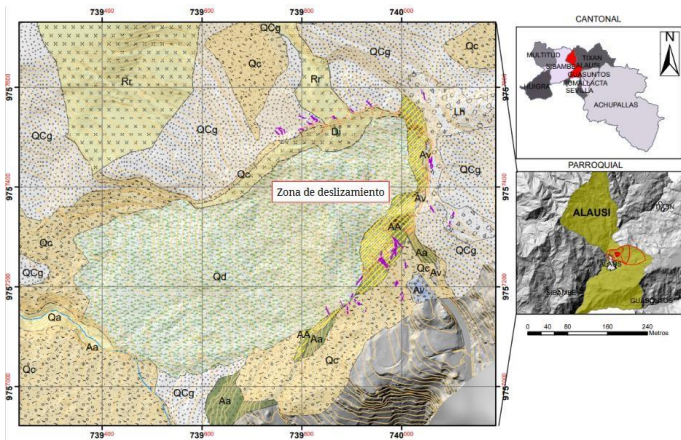


Figura 1. Mapa Geológico Zona de estudio, Alausí [16]

2.1.1. Ensayos Sísmica de Refracción

En la zona se realizaron ensayos de sísmica de refracción, en las vías principales del sector Casual y Palte. Para realizar la investigación del subsuelo del área de estudio se llevaron a cabo seis mediciones de velocidad de onda compresional.

El método consiste en medir el tiempo y distancia de propagación de las ondas sísmicas para determinar la velocidad. La metodología consiste en instalar geófonos de 4.5 Hz de frecuencia natural en la superficie del terreno a evaluar.

Las líneas realizadas dependieron de las condiciones de cada uno de los sitios, para este análisis se realizaron seis arreglos lineales de 100 m de largo, la configuración de los arreglos fue de 21 geófonos separados 5.00 m [2].

En la figura 2 se observa las líneas realizadas, se colocaron con el fin de alcanzar mayor profundidad de lectura debido a la geología del sitio. Para obtener el perfil de ondas se realizó 5 golpes entre los geófonos cada 2 geófonos.



Figura 2. Ubicación de líneas de refracción sísmica [2]

Con los datos registrados, se obtuvo perfiles de velocidad V_p , identificándose capas con rigidez variable. Los resultados que se obtienen después del análisis se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados sísmica de refracción [2]

TIPO DE SUELO	V_p (m/s)
Suelos con rigidez de baja a media	555.0
Suelos muy densos y rocas blandas	1125.0
Rocas de rigidez media o superior	2249.5

2.1.2. Ensayos MASW y MAM

El ensayo MASW es un método no invasivo que permite obtener de manera indirecta las ondas de corte V_s , este método se basa en la medición e interpretación de ondas superficiales tipo Rayleigh que son generadas por la combinación de ondas V_p y ondas V_s .

Dadas las condiciones del sitio se conformaron siete arreglos lineales de aproximadamente 100 metros. Los arreglos lineales quedaron definidos por la separación entre geófonos y la distancia de impacto al último geófono [1].

La velocidad de onda de corte V_s se asocia a la rigidez a corte del suelo, por lo que este parámetro resulta muy útil como información geotécnica. A continuación, en la figura 3 se presenta la ubicación de los arreglos.



Figura 3. Ubicación de los arreglos Vs [1].

Para identificar el tipo de perfil de suelo correspondiente a cada uno de los sitios donde se ejecutaron los tendidos geofísicos se utilizó como referencia la clasificación de los perfiles de suelo mostrados en la NEC-15 [14].

Tabla 2. Tipo de perfil [2]

Tendido Geofísico	Vs30 (m/s)	Tipo de Perfil
Vs-01	420	Tipo C
Vs-02	370	Tipo C
Vs-03	430	Tipo C
Vs-04	305	Tipo D
Vs-05	477	Tipo C
Vs-06	420	Tipo C

Se determinó la velocidad de onda para cada uno de los estratos. Los resultados que se obtienen después de un análisis se detallan en la tabla 3.

Tabla 3. Datos obtenidos velocidad de onda de corte Vs [2].

TIPO DE SUELO	Vs (m/s)
Suelos con rigidez de baja a media	281.15
Suelos muy densos y rocas blandas	582.27
Rocas de rigidez media o superior	1312.43

2.1.3. Ensayos SEV

El sondeo eléctrico vertical SEV es una técnica geoelectrica utilizada para estudiar la variación de la resistividad eléctrica del suelo con la profundidad su objetivo principal es caracterizar el perfil

estratigráfico y localizar la presencia de agua subterránea.

Este ensayo se basa en inyectar corriente eléctrica en el terreno y medir la diferencia de potencial entre dos puntos, variando progresivamente la separación entre los electrodos, para investigar distintas profundidades [11].

Los sondeos eléctricos verticales SEV se realizaron dentro del polígono que delimita el área de interés como se observa en la figura 4. Dadas las condiciones del terreno se conformaron seis arreglos lineales de aproximadamente 300 metros.

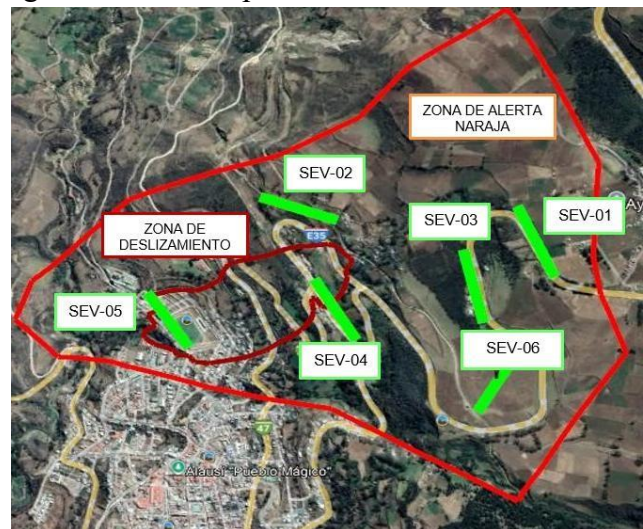


Figura 4. Ubicación de los arreglos SEV

2.1.4. Perforaciones SPT

Es un ensayo de campo in situ realizado para extraer muestras y determinar el número de golpes para estimar la resistencia del suelo frente a una energía de impacto dinámica. Este ensayo consiste en dejar caer un martillo de 63.5 kg sobre la cabeza de golpeo de la barra de perforación. Se hinc a 45 cm y los primeros 15 cm se descarta, los 30 cm posteriores se cuenta el número de golpes N para cada 15 cm a una altura de caída de 76.2 cm.

$$N = N_1 + N_2$$

Donde

N: Numero de golpes

N1: Numero de golpes necesarios para hincar los primeros 15 cm

N2: Numero de golpes necesarios para hincar los segundos 15 cm

Para determinar los parámetros físicos y mecánicos de los estratos de suelo, se realizaron seis perforaciones cuya profundidad mínima es de 45 m como muestra la tabla 4, una vez concluido el estrato de suelo y habiendo hallado materiales rocosos se utilizó el método a rotación con recuperación continua de testigos [2].

Tabla 4. Profundidad de perforaciones [2].

Perforación	Prof. Perforación (m)
P-01	45.45
P-02	45.00
P-03	50.00
P-04	45.00
P-05	55.00
P-06	45.00

En la figura 5 se observa la ubicación de las 6 perforaciones realizadas en la zona de estudio.



Figura 5. Ubicación de las perforaciones [2].

2.1.5. Ensayos de Permeabilidad

Se realizó ensayos en campo para determinar el coeficiente de permeabilidad (k) del suelo en estudio, mediante el método de LeFranc de carga variable, este ensayo se realiza in situ, después de realizar la perforación se suministra agua para dejar fluir y observar como varía el nivel del agua en función del tiempo, se mide el descenso del

nivel de agua y se registran los valores de altura de agua con respecto al fondo [2].

Una vez realizados los ensayos, se recolecta y analiza los datos, a continuación en la tabla 5 se detallan los resultados obtenidos.

Tabla 5. Resultados del ensayo de permeabilidad [2].

TIPO DE ESTRATOS	K (m/s)
Suelos con rigidez de baja a media	2.3E-05
Suelos muy densos y rocas blandas	1.4E-09
Rocas de rigidez media o superior	6.9E-11

2.1.6. Perfiles Geológicos

En esta sección se detalla los perfiles geológicos de la zona de estudio.

En la figura 6, se observa la zona afectada después del deslizamiento y el cambio debido a la pérdida de material.

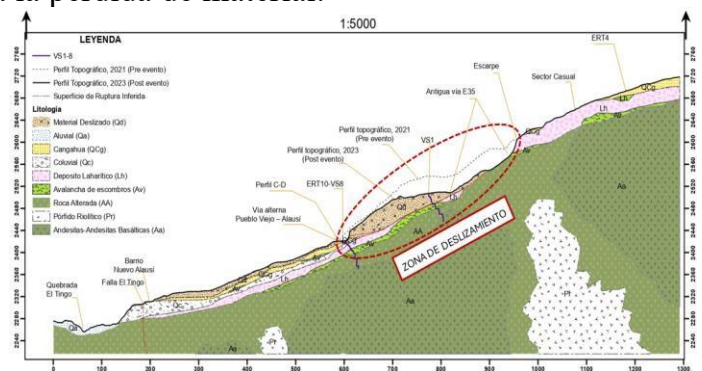


Figura 6. Perfil Área Deslizada [16]

La figura 7 indica la ubicación de los perfiles estratigráficos de la zona, estos perfiles son el resultado de investigaciones geotécnicas [3].

Las figuras 8, 9, 10, 11 se visualiza el perfil geológico donde se encuentran tres unidades geológicas (Suelos con rigidez de baja a media, suelos muy densos, rocas blandas y rocas de rigidez media o superior), muestran los puntos de las perforaciones y la ubicación de la medición de velocidad de onda de corte Vs.

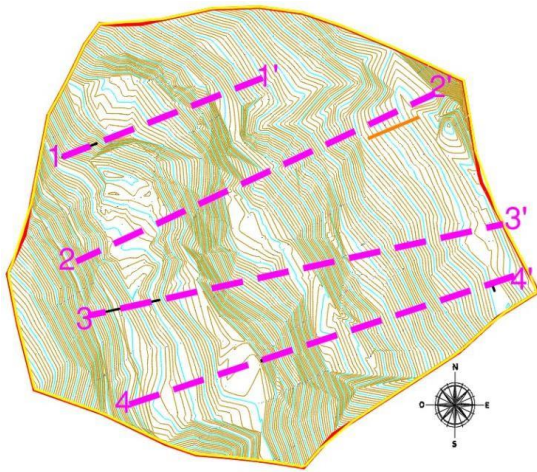


Figura 7. Ubicación de perfiles estratigráficos. [3]

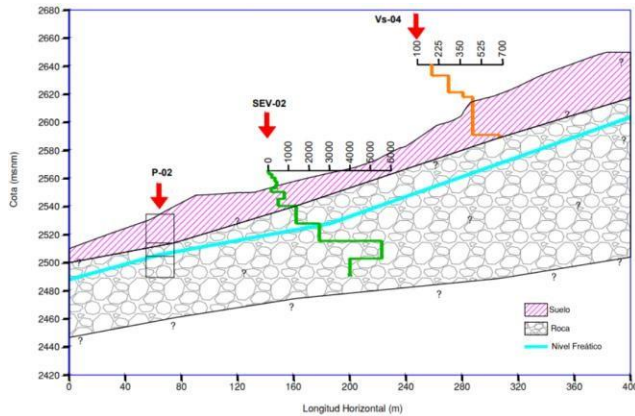


Figura 8. Perfil Estratigráfico 1-1 [3]

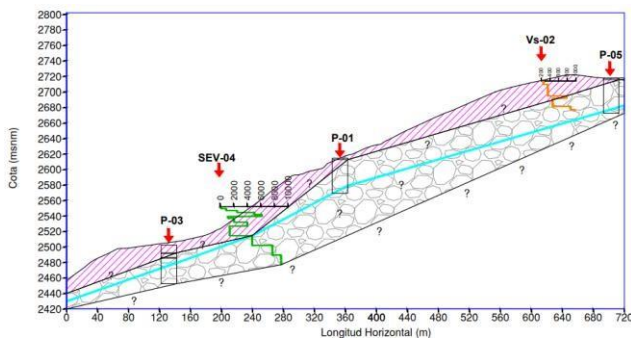


Figura 9. Perfil estratigráfico 2-2. [3]

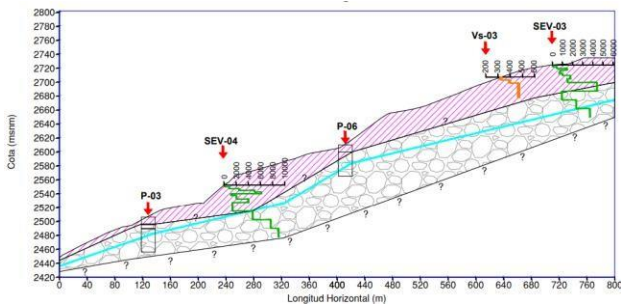


Figura 10. Perfil Estratigráfico 3-3 [3]

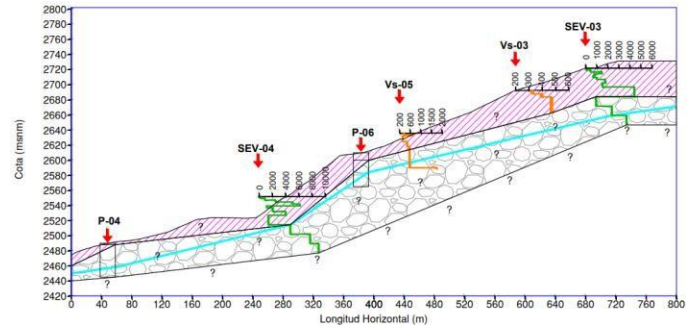


Figura 11. Perfil estratigráfico 4-4 [3]

2.2. Métodos de análisis

2.2.1. Análisis de estabilidad de taludes

La estabilidad en un talud se refiere a la capacidad que tiene una porción de suelo de mantenerse en equilibrio ante la acción de fuerzas gravitacionales, sísmicas o las ejercidas por el flujo subterráneo.

En la figura 12 se observa que si la pendiente de suelo es bastante grande, puede ocurrir falla del talud y el suelo puede deslizarse hacia abajo, esto se debe a que la fuerza motriz supera la resistencia del suelo al corte a lo largo de la superficie de ruptura [4].

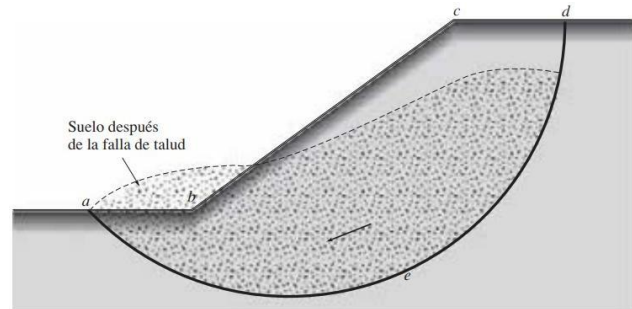


Figura 12. Falla de talud [4].

Para el caso de estudio del cerro Casual se realizó una modelación tridimensional para comprobar la estabilidad del talud. Para este proceso de análisis se evalúan variables como la estratificación del suelo y sus parámetros de resistencia al corte. Con este análisis se determina el factor de seguridad FS (1).

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

Donde

τ_f : Resistencia del suelo al corte.

τ_d : Esfuerzo cortante promedio desarrollado a lo largo de la superficie potencial de falla.

Cuando FS es igual a 1 el talud está en estado de equilibrio limite, FS mayor que 1 es estable y FS menor a 1 se encuentra inestable o en condición de falla. La normativa ecuatoriana indica que el factor de seguridad para taludes en condiciones estáticas es de 1.5 y en condiciones pseudoestático es de 1.05 [14].

El análisis de estabilidad de taludes es un punto importante en el estudio, ya que este permite determinar un factor de seguridad por lo tanto actúa como indicativo para la prevención de deslizamientos.

2.2.2. Análisis Estático

Es un análisis que evalúa la estabilidad del suelo bajo condiciones donde solo intervienen las cargas de peso propio, nivel de agua y otras cargas. Se basa en el equilibrio de fuerzas y momentos, esta estimación estática se realiza para condiciones de carga gravitacional.

Este análisis parte de suponer que las cargas aplicadas no varían en el tiempo y no inducen aceleraciones [5], con el análisis estático se busca determinar un factor de seguridad que relaciona fuerzas resistentes estáticas y fuerzas movilizantes estáticas (ecuación 2).

$$FS = \frac{\sum F_{resistentes\ est.}}{\sum F_{deslizantes\ est.}} \quad (2)$$

Las fuerzas resistentes estáticas se oponen al movimiento, es decir mantienen el talud en equilibrio, estas fuerzas se derivan de la resistencia del suelo al corte y se determinan con los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna [4].

Las fuerzas movilizantes provocan el movimiento de la masa de suelo, van en dirección paralela a la superficie de falla, pueden aumentar por la presencia de agua (Presión de poro). La fuerza movilizante se puede expresar como la componente tangencial del peso total de la masa sobre el plano de falla [4]. Cuando la fuerza movilizante supera a la fuerza resistente provoca el deslizamiento.

En el análisis estático el nivel freático influye sobre dos aspectos fundamentales, la resistencia al corte del suelo que depende de la tensión efectiva cuando el nivel freático se eleva el valor de la

presión de poro aumenta lo que provoca una reducción de la tensión efectiva esto hace que la resistencia al corte del suelo disminuya por lo tanto reduce las fuerzas resistentes [4].

Por otro lado, la presencia de agua aumenta el peso total del volumen del suelo y también la componente tangencial del peso sobre el plano de falla, esto provoca un incremento de las fuerzas movilizantes [6]. Si el nivel freático aumenta provoca menos estabilidad, puede disminuir el FS y existe mayor probabilidad de deslizamiento.

2.2.3. Análisis Sísmico

El análisis sísmico es el método para evaluar cómo se comporta el talud frente a las solicitaciones sísmicas, ya que las fuerzas inerciales desestabilizan el suelo. Existen dos enfoques: el análisis dinámico tiempo- historia y el método pseudoestático siendo este último el método para emplear en esta investigación, consiste en representar la acción del sismo como una fuerza horizontal que simula la aceleración inercial en la masa del suelo que genera el sismo [7].

El objetivo principal del análisis sísmico es determinar si el suelo se encuentra estable ante cualquier solicitación sísmica ante una probabilidad de ocurrencia.

Las fuerzas inerciales que representan los efectos sísmicos son: fuerzas horizontales F_h (ecuación 4) y fuerzas verticales F_v (ecuación 5) que se definen como:

$$FS = \frac{\sum F_{resistentes\ sismicas}}{\sum F_{deslizantes\ sismicas} + \sum F_{sismo}} \quad (3)$$

$$F_h = \frac{a_h * W}{g} = k_h * W \quad (4)$$

$$F_v = \frac{a_v * W}{g} = k_v * W = 0 \quad (5)$$

Donde

a_h, a_v : Aceleraciones

k_h, k_v : Coeficientes sísmicos

W: Peso

Para el análisis pseudoestático se hace uso de los resultados obtenidos en los ensayos

geotécnicos de la tabla 2 que contiene los valores de Vs30, que permiten determinar el tipo de suelo.

La demanda sísmica para el análisis pseudoestático será del 60% de la aceleración máxima en el terreno [14].

Para el caso de estudio se determinaron coeficientes basados en la NEC que se detallan a continuación:

- Aceleración normalizada sísmica máxima esperada en el sitio

$$a_{max} = z * F_a \quad (6)$$

- Aceleración pico en roca firme según zonificación sísmica $z=0.35$
- Factor de amplificación sísmica, depende del tipo de suelo $F_a=1.23$
- Coeficiente pseudoestático horizontal

$$K_h = 0.6 * a_{max} \quad (7)$$

El programa MIDAS GTS NX utiliza coeficiente pseudoestático resultante ya que requiere dos componentes horizontales en cada dirección por eso se aplicó la ecuación 8 ya que la fuerza debe ir en dirección del deslizamiento.

$$K_{hr} = \frac{K_h}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

2.2.4. Elementos Finitos SRM (Strength Reduction Method)

En los últimos años la solución de problemas mediante métodos numéricos se ha ido desarrollando y tomando reconocimiento por sus técnicas mejoradas.

El análisis de estabilidad de taludes mediante el método de elementos finitos es un método numérico que analiza el factor de seguridad mínimo y el comportamiento de falla utilizando diversas formas, cargas y condiciones de contorno [8].

El método SRM consiste en realizar varias iteraciones reduciendo los parámetros de cohesión y ángulo de fricción hasta que el modelo ya no converge, este es el indicativo de que ha llegado al estado de falla. El coeficiente de reducción de

resistencia en ese punto (ecuación 9 y 10) relaciona el ángulo de fricción y cohesión real con el ángulo de fricción y cohesión reducido los cuales se utiliza para calcular el factor de seguridad mínimo del talud [8].

$$f = \frac{\phi}{\phi_r} = F_s \quad (9)$$

$$f = \frac{c}{c_r} = F_s \quad (10)$$

Donde

f: Factor de reducción

ϕ : Ángulo de fricción

ϕ_r : Ángulo de fricción reducido

c: Cohesión

c_r : Cohesión reducido

F_s : Factor de seguridad

Este método va incrementando el valor del factor de reducción hasta que ya no converge y obtiene deformaciones excesivas, este valor crítico es equivalente al factor de seguridad real del talud [8].

2.2.5. Red de Flujo

La red de flujo es la representación del movimiento que tiene el agua en un medio poroso. El suelo al tener una permeabilidad incierta puede variar de un punto a otro esto hace que las trayectorias del flujo y la presión de poro sea complejas.

La construcción de la red de flujo es una solución indirecta a la ecuación de Laplace (ecuación 12) ya que se deriva del principio de conservación de masa (flujo continuo) [9], donde las propiedades son uniformes en todas las direcciones (medio homogéneo) (ecuación 11).

La solución de esta ecuación son dos familias de curvas, las equipotenciales y las líneas de corriente. Las primeras indican los lugares donde la carga hidráulica es igual, estos puntos poseen una misma energía total, estas indican como varía la presión de agua en el suelo. Las líneas de corriente muestran la dirección del flujo, indican que trayecto sigue el agua subterránea a través de un medio poroso. Las dos familias son ortogonales entre sí, es decir se cruzan en ángulo recto y las dos forman la red de flujo.

$$k_x = k_y = k_z \quad (11)$$

$$k \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (12)$$

Donde

$h(x,y,z)$: Carga hidráulica total.

x, y, z : Coordenadas.

Para este caso se asume como un medio saturado con flujo laminar, esta ecuación describe el comportamiento que tiene el flujo de agua bajo algunas condiciones.

En modelos numéricos de elementos finitos 3D esta ecuación se resuelve al fraccionar la ecuación en la malla generada, se impone condiciones de borde (drenaje y nivel freático), a partir de esto se calcula las presiones de poro que es importante en el análisis de estabilidad. La red de flujo evalúa como el agua afecta en el comportamiento mecánico del suelo [8].

2.3. Modelo Numérico Tridimensional

En la investigación el modelo numérico tridimensional del cerro Casual realizado permitió simular el comportamiento del terreno mediante elementos finitos que matemáticamente representa las condiciones reales del terreno como la superficie, estratos, manantiales naturales, nivel freático y condiciones estáticas y sísmicas. El objetivo principal del modelo numérico es simular diferentes escenarios o situaciones que pueden presentarse.

2.3.1. Construcción del modelo en 3D

La modelación del cerro Casual partió de la creación de la superficie antes y después del deslizamiento. Se utilizó modelos digitales de elevación que fueron procesados en un sistema de información geográfica para generar curvas de nivel, esta fue la base para definir la superficie del terreno. Este paso es importante ya que garantiza la precisión de los resultados posteriores como se observa en la figura 13.

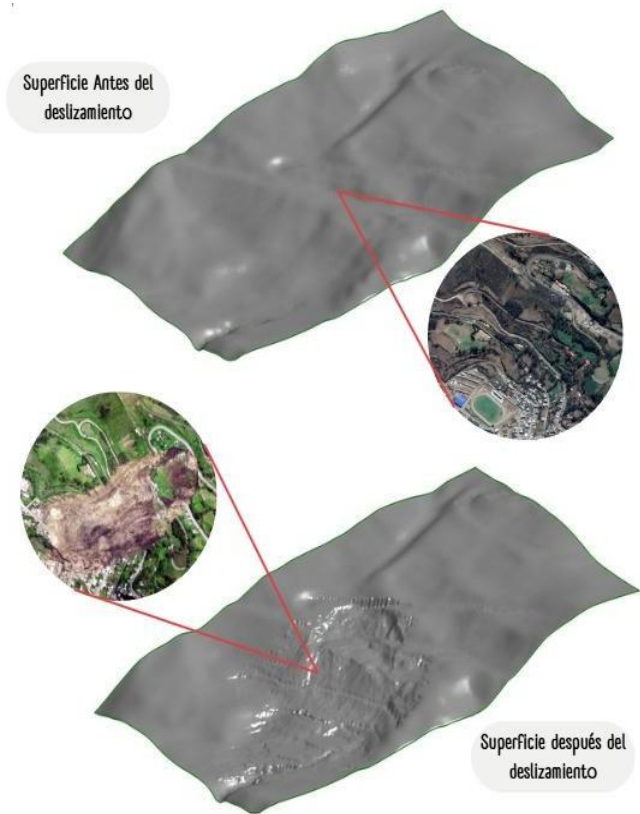


Figura 13. Superficies Cerro Casual

En la figura 14 se definen cada uno de los estratos del cerro Casual mediante los resultados de perforaciones, ensayos de velocidad de onda y los perfiles estratigráficos mencionados; se asigna los materiales y propiedades con los parámetros obtenidos a partir de las ecuaciones de la geofísica como la cohesión, ángulo de fricción, módulo de elasticidad y coeficientes de permeabilidad.

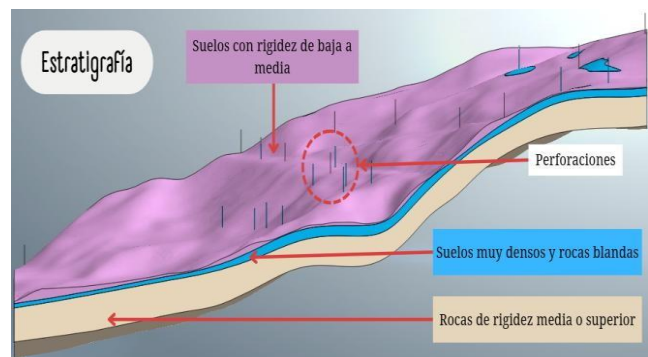


Figura 14. Estratigrafía del Cerro Casual

Una vez definida la geometría y los materiales en los análisis se procede al mallado (figura 15). El programa MIDAS GTS NX cuenta la herramienta

Size Control que permite definir el tamaño de celda que se quiere dar a cada uno de los estratos.

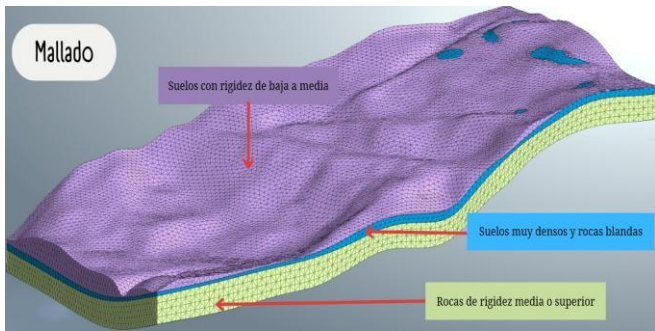


Figura 15. Mallado de la Superficie del Cerro Casual

Se asignó las condiciones para representar el estado físico real del terreno antes del deslizamiento: manantiales naturales y quebradas, nivel freático determinado con los ensayos de SPT y SEV, condiciones de drenaje que simula el flujo del agua subterránea, condiciones de borde que representan el comportamiento real del terreno, finalmente se asigna el peso propio a todo el terreno.

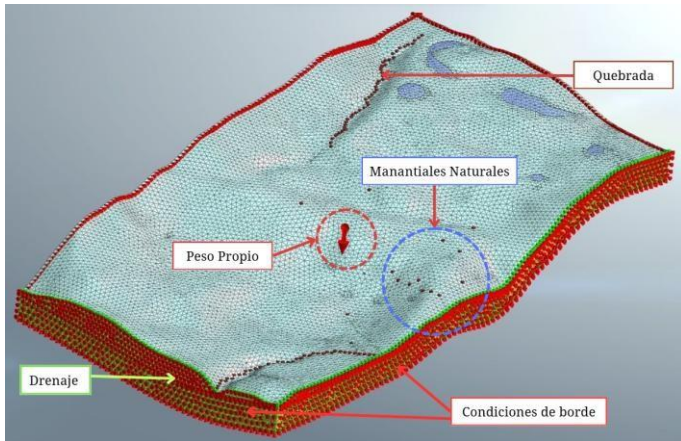


Figura 16. Condiciones Cerro Casual

2.3.2. Método Acoplado

Para determinar el factor de seguridad que permita conocer las condiciones actuales de estabilidad del cerro Casual se utilizó el método de análisis acoplado Stress-Seepage-Slope este análisis consta de dos etapas en cada una se pueden añadir o eliminar condiciones [8]. Para esta investigación se realizó:

La Etapa 1 el análisis de red de flujo (steady-state), se toma en cuenta las condiciones de borde, el nivel freático, vertientes y drenaje.

Etapa 2 realizó el análisis de estabilidad (Stress) por el método SRM, se toma en cuenta el peso propio, estratos y condiciones de borde.

Este método permite modelar de manera realista el comportamiento mecánico del suelo, el flujo de agua en el suelo (presión de poro) y la estabilidad del talud. Se determinó el factor de seguridad y las deformaciones que en la superficie se presenta.

3. Resultados y Discusión

A continuación, se presenta los resultados obtenidos a partir de los análisis realizados en la zona de estudio. Los resultados corresponden a condiciones estáticas y sísmicas, el objetivo es evaluar la estabilidad del talud del cerro Casual en su condición actual. Los valores obtenidos de factor de seguridad permitieron identificar las zonas críticas y estimar el comportamiento del talud frente a estas condiciones. La información que se detalla a continuación contribuye como base para un análisis de riesgo.

3.1. Análisis inicial antes del deslizamiento

Se realizó una clasificación de los datos proporcionados de la zona de estudio. La información recopilada permitió estimar parámetros geotécnicos a partir de las velocidades de onda y correlaciones [17]. Se definió los estratos principales en el cerro Casual: suelos con rigidez de baja a media, suelos muy densos-rocas blandas y rocas de rigidez media o superior.

Una vez determinadas las condiciones iniciales se realizó la calibración del modelo mediante un retro análisis que consiste en ajustar las propiedades mecánicas del suelo, la cohesión y el ángulo de fricción; se ejecuta el modelo con los datos iniciales y se van comparando los resultados de: presión de poro, desplazamientos y principalmente el factor de seguridad FS.

El resultado del modelo no llegó al FS igual a 1 por ello se realizó un proceso de iteración donde se ajustaron los parámetros de cohesión y el ángulo de fricción por medio de correlaciones que se encuentran en función de la humedad [10], por lo tanto, se planteó el incremento en la humedad hasta conseguir los parámetros geo mecánicos que permitieron que el FS sea igual a 1, para el caso del cerro se realizó 3 iteraciones con un aumento de la humedad del 12.5%.

En la tabla 6 se detalla los resultados de los parámetros geo mecánicos del suelo que permitieron conocer las condiciones iniciales del cerro antes del deslizamiento sin la reducción por efecto de la humedad.

Tabla 6. Parámetros Geo mecánicos iniciales del suelo

Parámetros	Unidades	Suelos con rigidez de baja a media	Suelos muy densos y rocas blandas	Rocas de rigidez media o superior
Coefficiente de Poisson	-	0.36	0.33	0.25
Cohesión	tonn/m2	6.80	6.40	9.30
Ángulo de fricción	Grados	28.92	28.90	30.71
Módulo de elasticidad	tonn/m2	3746.50	9272.80	30990.90
Peso específico	tonn/m3	1.95	2.00	2.32
Peso específico seco	tonn/m3	1.61	1.63	2.26
Peso específico saturado	tonn/m3	1.99	2.05	2.39
Permeabilidad	m/s	2.3×10^{-5}	1.4×10^{-9}	6.9×10^{-11}

3.1.1. Red de flujo

Para evaluar el comportamiento de agua en el cerro Casual se realizó un modelo que estimó el flujo del agua en condición estacionaria con los parámetros geotécnicos calibrados.

En la figura 17 se evidencia el desarrollo del nivel freático al interior de la masa del suelo, donde existe un flujo descendente que coincide con el inicio de la quebrada en la parte alta del cerro Casual, este flujo de agua que genera la quebrada es obstruido por la vía de acceso de la ciudad, por lo tanto, este efecto pudo provocar una infiltración localizada afectando a los parámetros geo mecánicos del suelo que posterior coincide con la cabecera del talud.

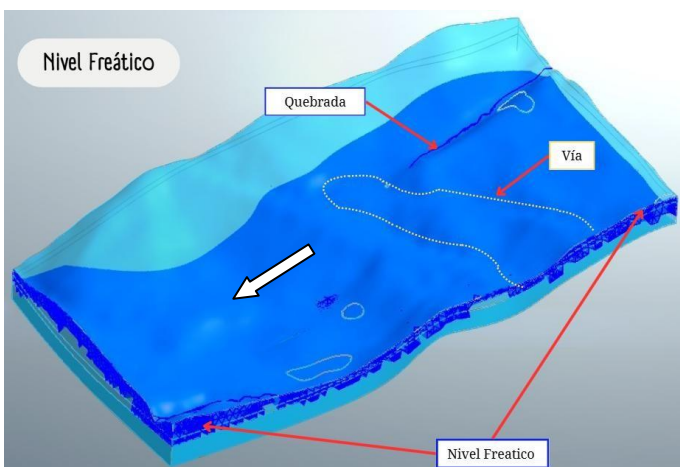


Figura 17. Nivel Freático superficie Cerro Casual antes del deslizamiento

En la figura 18 se observa el resultado de las velocidades de flujo que van desde 1.42×10^{-7} m/s

hasta 3.93×10^{-5} m/s lo que indica que existe mayor velocidad de flujo en las quebradas y manantiales naturales.

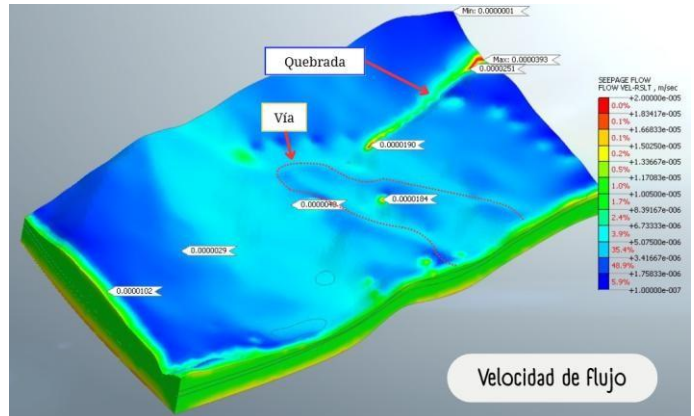


Figura 18. Velocidad de flujo resultante superficie antes del deslizamiento

Los vectores de flujo indican que existe flujo descendente del punto 1 al 2 como se indica en la figura 19, la quebrada alimenta al acuífero es por eso que provoca la saturación directa en el punto 2.

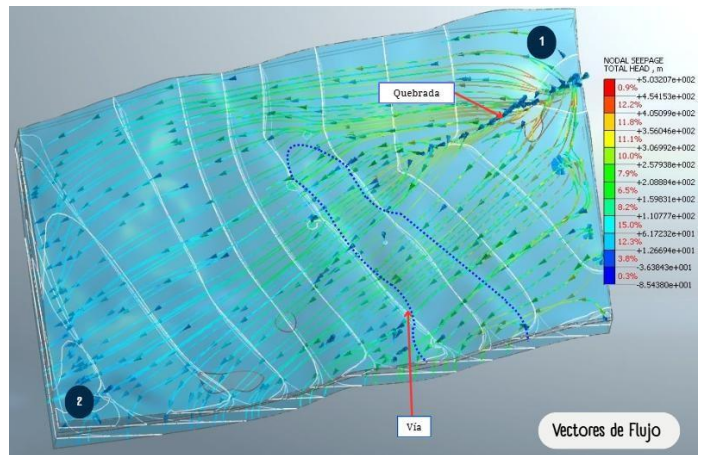


Figura 19. Líneas de corriente de flujo antes del deslizamiento

En la figura 20 se observó que la presión de poro se encuentra en las zonas bajas del cerro representado por valores positivos, el color naranja en la superficie representa los sitios con mayor valor de presión de poro; las zonas con color azul indica zonas donde no hay presencia de agua por lo tanto no hay presión de poro.

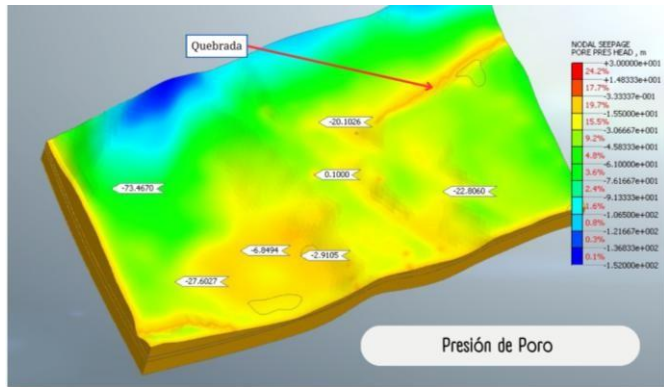


Figura 20. Presión de poro antes del deslizamiento

3.1.2. Estabilidad del talud

3.1.2.1. Calibración de parámetros geomecánicos

Para evaluar la estabilidad del talud del cerro Casual en la segunda etapa se aplicó el método de análisis de estabilidad por el método SRM.

Para el modelo previo al deslizamiento se utilizó los parámetros calibrados de cohesión y ángulo de fricción después de realizar un incremento del 12.5 % a la humedad natural, los datos calibrados se indican en la tabla 7, en consecuencia, se obtuvo un factor de seguridad de 1.02, que indica el equilibrio limite esto permitió que la simulación se acerque a las condiciones en las que se encontraba el suelo del cerro el día del evento como se observa en la figura 21.

Tabla 7. Datos calibrados

Parámetros	Unidades	Suelos con rigidez de baja a media	Suelos muy densos y rocas blandas	Rocas de rigidez media o superior
Ángulo de fricción	Grados	24.98	22.32	30.71
Cohesión	tonnf/m ²	6.60	3.60	9.30

En la figura 22 se observa el desplazamiento ocurrido en la zona con dirección descendente siguiendo el curso de la pendiente del terreno, este desplazamiento verifica el estado en el que quedo el cerro Casual luego de producido el evento, los resultados coinciden con el movimiento de masa real.

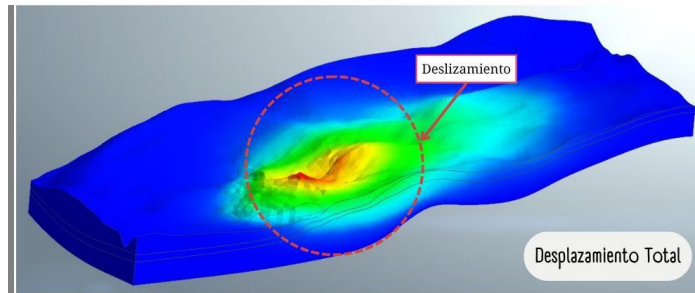


Figura 22. Desplazamiento de tierra Cerro Casual

3.2. Análisis actual del deslizamiento

Con los parámetros calibrados se realizó el modelo numérico tridimensional actual para conocer las condiciones en las que se encuentra el cerro, este modelo es una representación del estado real que tiene el cerro Casual sin incluir fenómenos naturales. El modelo coincide con la ortofoto entregada, eso valida los resultados obtenidos posteriormente. En la imagen 23 se puede apreciar que el deslizamiento registrado es de tipo rotacional [13], este deslizamiento generó un movimiento de masa donde una la porción de suelo se desplazó ladera abajo.

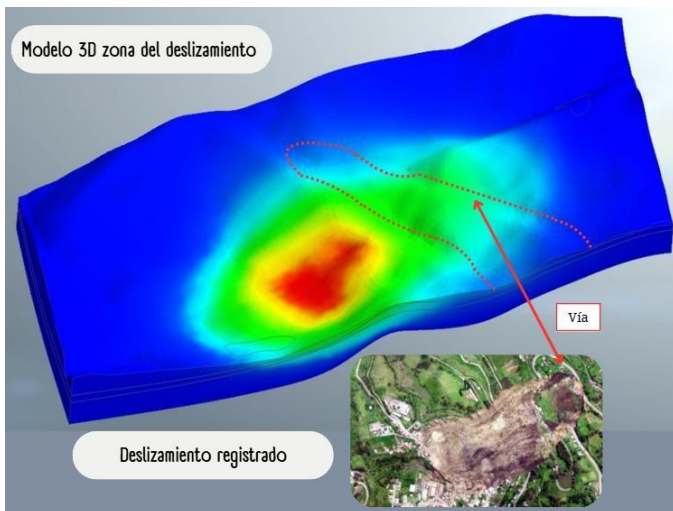


Figura 21. Modelo 3D Cerro Casual antes del deslizamiento.



Figura 23. Mapa de identificación del Polígono de impacto [3].

3.2.1. Red de flujo

En la figura 24 se evidencia que el desarrollo del nivel freático al interior de la masa del suelo aumentó con respecto al análisis antes del deslizamiento mostrado en la figura 17, por lo tanto, existe un flujo descendente, que se identifica en la zona y se debe a que en la actualidad ya no posee parte del primer estrato por lo tanto los manantiales naturales se aprecian con facilidad.

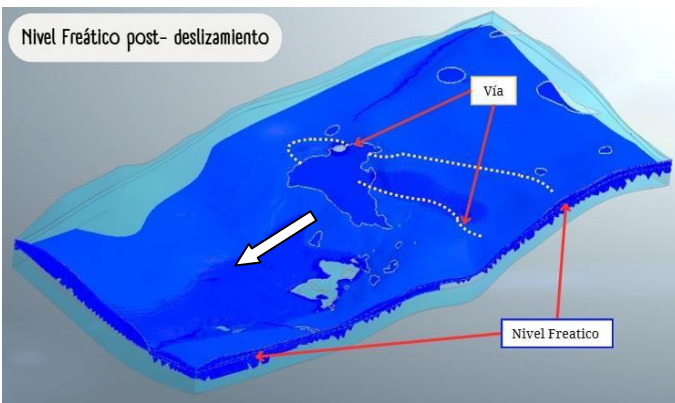


Figura 24. Nivel Freático superficie Cerro Casual después del deslizamiento.

En la figura 25 se observa el resultado de las velocidades de flujo posterior al deslizamiento, estas van desde 2.1×10^{-7} m/s hasta 8.33×10^{-5} m/s lo que indica que existe un incremento en la velocidad de flujo en los manantiales naturales por el cambio geomorfológico.

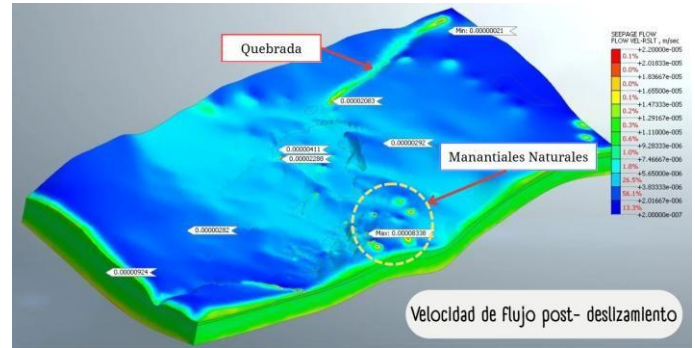


Figura 25. Velocidad de flujo resultante superficie después del deslizamiento

En la figura 26a se observó los vectores de flujo indican que existe flujo descendente del punto 1 al 2 como se indica en la figura 26, la dirección del flujo ahora se ve interrumpido por las zonas deslizadas, por lo que provoca que la saturación de la parte baja del cerro Casual cambie como se indica en la figura 26b debido a que el flujo se concentra en las zonas cercanas a los manantiales naturales punto 3 y en la margen derecha.

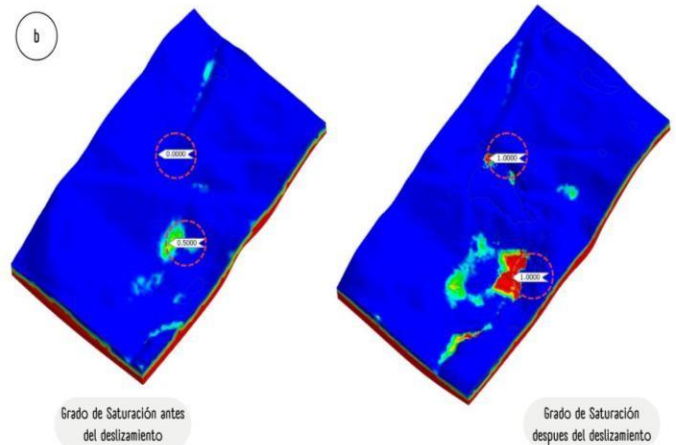
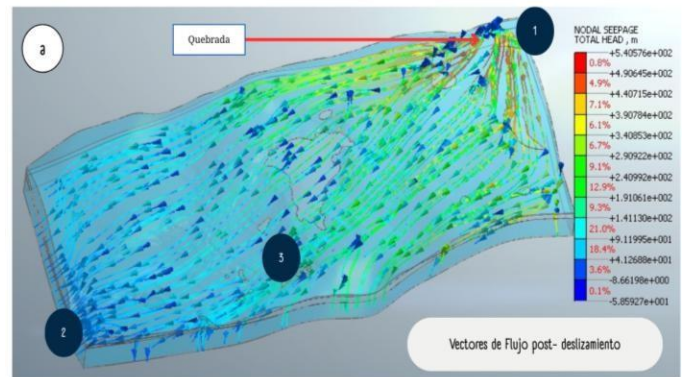


Figura 26. a. Líneas de corriente de flujo después del deslizamiento. b. Grado de saturación

En la figura 27 se observó que la presión de poro sigue en las zonas bajas de la superficie, esto indica que la presencia de agua en los manantiales naturales aumento; ahora las zonas donde se concentra mayor cantidad de agua es en la zona 3.

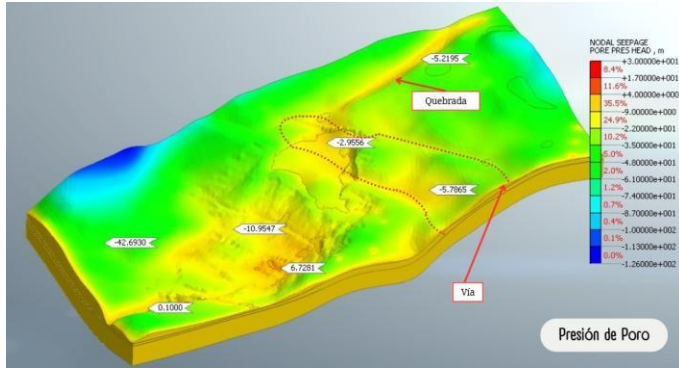


Figura 27. Presión de poro después del deslizamiento

3.2.2. Análisis estático.

Para el modelo posterior al deslizamiento se obtuvo un factor de seguridad de 1.13, que indica que en la actualidad se encuentra estable sin embargo según la NEC el talud se encuentra propenso a un nuevo deslizamiento lo que aumenta un gran peligro para la población. Se debe considerar que la presencia de lluvia también puede afectar en la estabilidad.

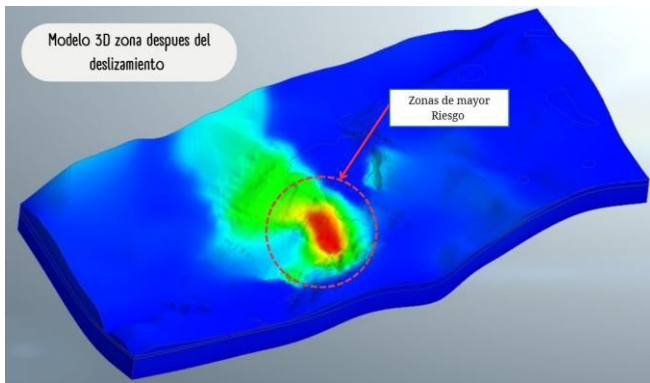


Figura 28. Modelo 3D Cerro Casual después del deslizamiento.

En la figura 29 se observa el posible desplazamiento en la zona, esta se ubica a un costado del deslizamiento siendo un peligro para la población ubicada en el margen derecha e izquierda, la presencia de manantiales naturales y la presencia de lluvia pueden generar zonas de acumulación de agua y esto debilita el suelo generando un posible deslizamiento. Esta zona de riesgo se ubica dentro del polígono de alerta

naranja esta zona es susceptible a movimientos de tierra.

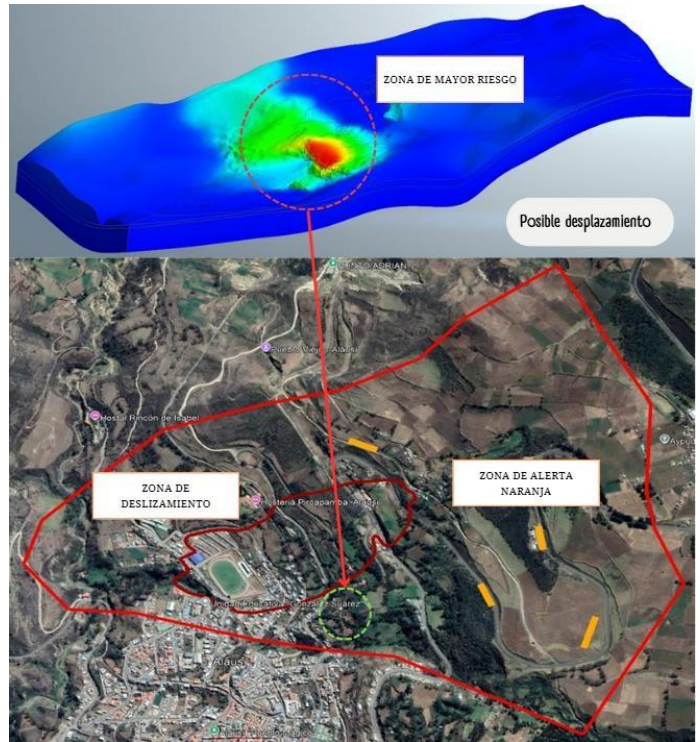


Figura 29. Posible desplazamiento de tierra Cerro Casual

La figura 30 indica la zona del deslizamiento y la zona de mayor riesgo que fue establecida luego del análisis de resultados, la zona de riesgo se encuentra ubicada en la margen izquierda del deslizamiento afectando a las comunidades del sector conocido como Casual. Se recomienda realizar monitoreos en la zona con el fin de precautelar la seguridad de la comunidad.

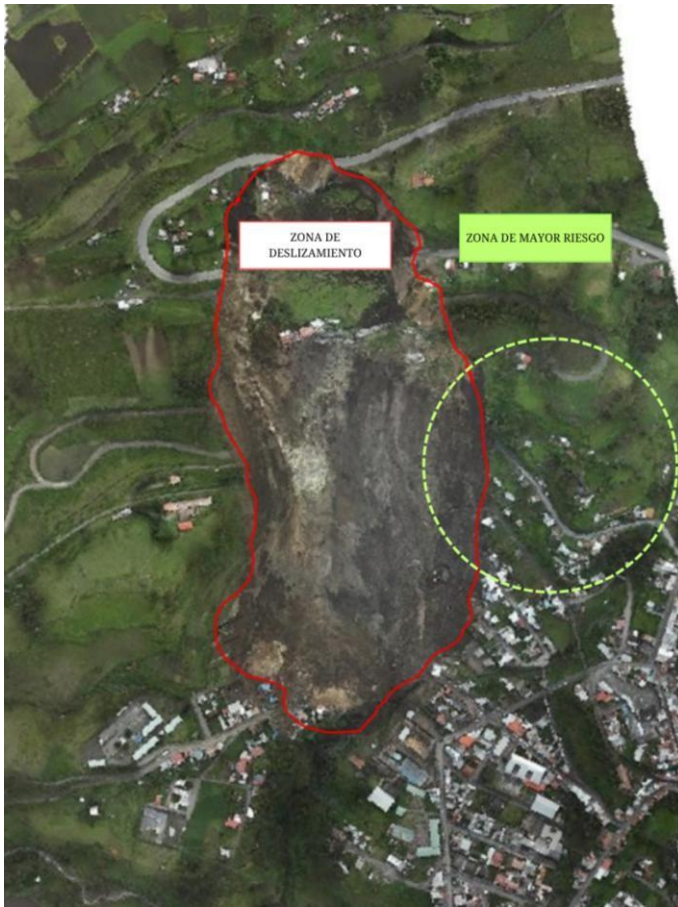


Figura 30. Zona de mayor riesgo [3].

3.2.3. Análisis pseudoestático

Para evaluar el comportamiento del cerro en condiciones sísmicas, se realizó un análisis pseudoestático, este considera fuerzas horizontales que se aplican en dirección del deslizamiento, para este caso se utilizó una fuerza k_{hr} igual a 0.183, este análisis simula el efecto del sismo sobre la zona dando un valor FS igual a 1.00 siendo inferior al establecido en la norma NEC-15, el valor obtenido indica la vulnerabilidad que tiene la zona en condiciones actuales ante un sismo de diseño para un periodo de retorno de 475 años. En la figura 31 se observa la zona de mayor riesgo, donde podría ocurrir un nuevo desplazamiento, esta zona se ubica en el antiguo sector Casual zona que ya fue afectada en 2023.

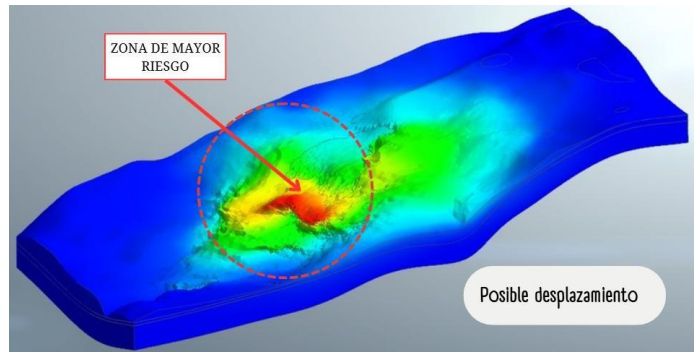


Figura 31. Zona de riesgo bajo carga sísmica

En la tabla 7 se detalla el factor de seguridad obtenido para cada análisis, según los criterios establecidos en la norma ecuatoriana NEC-15 los dos factores de seguridad tanto en estático como sísmico no cumplen con los valores mínimos establecidos para verificar la estabilidad indicando una condición crítica bajo las diferentes cargas.

Tabla 8. Comparación con los FS de la NEC-15

Análisis	Fs Obtenido	Fs min NEC	Observaciones
Estático	1.13	1.50	No cumple, riesgo en estado natural.
Pseudoestático	1.00	1.05	No cumple, tiene condición inestable ante evento sísmico.
Calibración	1.02	-	Valor ajustado para presentar el comportamiento previo al deslizamiento.

4. Conclusiones

La interpretación de los datos proporcionados por las entidades públicas como los ensayos de sísmica de refracción, ensayos MASW y MAM, ensayos SEV, perforaciones SPT y ensayos de permeabilidad, permitió caracterizar las condiciones del Cerro Casual en Alausí clasificando al suelo en 3 diferentes estratos y obteniendo parámetros geo mecánicos iniciales por medio de las correlaciones empíricas a partir de las velocidades de onda; esta interpretación facilitó la construcción del modelo numérico tridimensional en MIDAS GTS NX.

Para establecer los parámetros geo mecánicos del modelo numérico tridimensional en MIDAS GTS NX en condiciones actuales fue necesario realizar un retro análisis en donde se reduce la cohesión y ángulo de fricción interna mediante correlaciones que involucran un incremento de humedad con el fin de establecer el equilibrio límite (factor de seguridad aproximado a uno) del cerro Casual; como resultado se tiene la validación de las condiciones reales en la zona de estudio al igual que su geometría fue coincidente con la realidad.

La simulación de red de flujo permanente (Steady-State) en MIDAS GTS NX es la representación del movimiento que tiene el agua en un medio poroso por lo que se utilizó la ubicación de manantiales naturales, nivel freático mediante sondeos eléctricos verticales SEV y perforaciones SPT, la red de flujo muestra la influencia directa que tiene el nivel freático y las presiones de poro con la estabilidad del talud; en el modelo numérico tridimensional post-evento en comparación al modelo inicial mostro una redistribución en las presiones de poro debido al deslizamiento ocurrido, esto ocasiono que el grado de saturación aumente y se acumule en la zona de los manantiales naturales del cerro Casual y por lo tanto afecta a la estabilidad del talud actual.

El análisis de estabilidad actual del cerro Casual en condiciones estáticas se lo determinó por el método SRM que incluye el análisis de la red de flujo previo, este método determina un punto de falla en donde el modelo no converge y establece el factor de seguridad mínimo de 1.13 el cual no se encuentra dentro de los límites establecidos por la NEC y no garantiza la estabilidad, por lo tanto, se debe tomar medidas en la zona de mayor riesgo liberando la presión de poro mediante la creación de pozos artesianos ubicados estratégicamente para no afectar a la comunidad.

Para el caso de estabilidad actual del cerro Casual en condiciones pseudoestáticas se utilizó el mismo método y el factor de seguridad mínimo de 1.00 que no se encuentra dentro de los límites establecidos por la NEC y no garantiza la estabilidad frente al peligro sísmico, por lo tanto,

se debe realizar un monitoreo constante o el uso de piezómetros que permitan evaluar las variaciones del nivel freático y presiones de poro que se generen.

La geometría del deslizamiento analizada coincide con la geometría del deslizamiento real lo que permitió validar los resultados, esto indica que la zona afectada esté representada correctamente y coincida con los estudios preliminares realizados que también indica la zona como de alto riesgo, además se debe considerar los cambios climáticos sobre todo las épocas de lluvias intensas donde el nivel freático aumenta, por lo tanto el factor de seguridad disminuye, se recomienda tomar las medidas preventivas correspondientes para evitar que produzca un nuevo deslizamiento.

Referencias

- [1] Instituto de Investigación Geológica y Energética, «LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN DE CAMPO Y CONSIDERACIONES GEOLÓGICAS EN EL DESLIZAMIENTO,» Quito, 2023.
- [2] GAD Parroquial Alausí, «CONSULTORÍA PARA EL ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA Y GEOTÉCNICA EN EL CANTÓN ALAUSÍ,» DAVIMEN, Quito, 2023.
- [3] Secretaria de Gestión de Riesgos, *CONSULTORÍA PARA EL ESTUDIO DE PROSPECCIÓN GEOFÍSICA Y GEOTÉCNICA EN EL CANTÓN ALAUSÍ DE LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO*, Alausi, 2024.
- [4] B. M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, México: CENGAGE Learning, 2015.
- [5] A. K. Chopra, Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, New Jersey : Pearson Education, 2012.
- [6] K. Terzaghi, R. B. Peck y G. Mesri, Soil Mechanics in Engineering Practice, Wiley-Interscience, 1996.
- [7] . S. L. Kramer y J. P. Stewart, Geotechnical Earthquake Engineering, CRC Press, 2024.
- [8] MIDAS GTS NX, «MIDAS GTS NX,» Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://surl.li/cjjube>.
- [9] J. Knappett y R. F. Craig, Craig's Soil Mechanics, New York: CRC Press , 2012.
- [10] . S. P. Llumiquinga, «Repositorio Institucional UPS,» 2022. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22575>.
- [11] W. Telford, L. Geldart y R. Sheriff, Applied Geophysics, New York: Cambridge University Press, 2004.
- [12] B. M. Das, Principios de Ingeniería Geotécnica, Cengage Learning, 2010.
- [13] L. Moreno, «Identificación de tipos de deslizamiento en la zona de acantilados,» *Universidad Nacional de Tumbes*, p. 250, 2022.
- [14] NEC, «Norma Ecuatoriana de la Construcción,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/7.-NEC-SE-GC-Geotecnia-y-Cimentaciones.pdf>.
- [15] L. Pilatasig, . L. Troncoso, F. J. Torrijo y E. Ibadango, «Casual-Nuevo Alausí Landslide (Ecuador, March 2023): A Case Study on the Influence of the Anthropogenic Factors,» *GeoHanzards*, vol. 1, p. 22, 2025.
- [16] Instituto de Investigación Geologica y Energetico, *ANEXO 2 MAPA LITOLÓGICO LOCAL ALAUSI*, Quito, 2023.
- [17] H. Naranjo y T. Dranichnikov, Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional, Quito: ABYA YALA, 2012.