



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**INFLUENCIA DEL AGUA INTERSTICIAL EN LOS PARÁMETROS DE
RESISTENCIA AL CORTE (TRIAxIAL UU) EVALUADO EN 2 SITIOS DEL
DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, APLICADO A LA ESTABILIDAD DE
TALUDES EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS EN TÉRMINOS DE
ESFUERZOS TOTALES**

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

AUTOR: Santiago Patricio Llumiquinga Llumiquinga
TUTOR: Freddy Israel Rodríguez Badillo

Quito - Ecuador
2022

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Santiago Patricio Llumiquinga Llumiquinga con documento de identificación N° 1721730776 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 12 de mayo del 2022

Atentamente,



Santiago Patricio Llumiquinga Llumiquinga

1721730776

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

Yo, Santiago Patricio Llumiquinga Llumiquinga con documento de identificación N°1721730776, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico “Influencia del Agua Intersticial en los Parámetros de Resistencia al Corte (triaxial UU) evaluado en 2 sitios del Distrito Metropolitano de Quito, aplicado a la estabilidad de taludes en Suelos parcialmente saturados en términos de Esfuerzos Totales”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 12 de mayo del 2022

Atentamente,



Santiago Patricio Llumiquinga Llumiquinga

1721730776

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: INLUENCIA DEL AGUA INTERSTICIAL EN LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE (TRIAxIAL UU) EVALUADO EN 2 SITIOS DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, APLICADO A LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS TOTALES, realizado por Santiago Patricio Llumiquinga Llumiquinga con documento de identificación N° 1721730776, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 12 de mayo del 2022

Atentamente,



Ing. Freddy Israel Rodríguez Badillo, MSc

1720094026

INFLUENCIA DEL AGUA INTERSTICIAL EN LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL CORTE (TRIAxIAL UU) EVALUADO EN 2 SITIOS DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO, APLICADO A LA ESTABILIDAD DE TALUDES EN SUELOS PARCIALMENTE SATURADOS EN TÉRMINOS DE ESFUERZOS TOTALES

INFLUENCE OF INTERSTITIAL WATER ON SHEAR STRENGTH PARAMETERS (TRIAxIAL UU) EVALUATED AT 2 SITES IN THE METROPOLITAN DISTRICT OF QUITO, APPLIED TO THE STABILITY OF SLOPES IN PARTIALLY SATURATED SOILS IN TERMS OF TOTAL STRESS

Santiago Patricio-LlumiQuinga¹, Freddy Israel-Rodríguez²

Resumen

En ingeniería civil uno de los aspectos más importantes a tomarse en cuenta en los proyectos de estabilidad de taludes, parte de la caracterización geomecánica del suelo en donde se va implantar la estructura.

La presente investigación tiene como objetivo aportar resultados en donde se determina la influencia de la humedad (ω) en la variación de los parámetros de resistencia al corte: cohesión (c), ángulo de fricción (ϕ), además del peso específico del suelo (γ).

Una vez definidos los sitios de estudio dentro del Distrito Metropolitano de Quito, se realizaron trabajos de campo para la extracción de bloques de suelo para el desarrollo de los ensayos en laboratorio (triaxial UU y clasificación SUCS), para obtener las propiedades de resistencia al corte, propiedades índices y tipo de suelo.

Posteriormente se realizó un análisis de regresión lineal múltiple en el que se

Abstract

In civil engineering, one of the most important aspects to be taken into account in slope stability projects is part of the geomechanical characterization of the soil where the structure will be implanted.

The objective of this research is to provide results in which the influence of humidity (ω) on the variation of shear strength parameters is determined: cohesion (c), friction angle (ϕ), in addition to the specific weight of the soil. (γ).

Once the study sites were defined within the Metropolitan District of Quito, field work was carried out to extract soil blocks for the development of laboratory tests (triaxial UU and SUCS classification), to obtain the shear strength properties, index properties and soil type.

Subsequently, a multiple linear regression analysis was carried out in which the reduction of the angle of friction and cohesion was determined, depending on the geomechanical

¹ Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito Ecuador

² Docente de la carrera de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito Ecuador

determinó la reducción del ángulo de fricción y cohesión, en función de los parámetros de resistencia al corte, humedad e índice de plasticidad, además de la variación del grado de saturación, humedad y peso específico. Luego se realiza un análisis de varianza (ANOVA), y partir de estos resultados se obtuvo una expresión que calcula la reducción del ángulo de fricción y cohesión en función de la variación de la humedad.

A continuación, se realizó un análisis de estabilidad de taludes usando el método de Bishop Simplificado e integrando las fuerzas resistentes y actuantes desde el inicio hasta al final del círculo de falla, se calculó el factor de seguridad y se determinó el porcentaje de reducción debido al incremento de humedad.

Palabras Clave: Estabilidad de taludes, correlaciones múltiples, humedad, parámetros de resistencia al corte, propiedades índices.

parameters of the soil, humidity and plasticity index, in addition to the variation of the degree of saturation, humidity and specific weight. An analysis of variance (ANOVA) is then performed, and from these results an expression is obtained that calculates the reduction of the friction angle and cohesion as a function of humidity variation.

Afterwards, a slope stability analysis was carried out using the Simplified Bishop method and integrating the resistant and acting forces from the beginning to the end of the failure circle, the safety factor was calculated and its reduction percentage was determined due to the increase in humidity.

Keywords: Slope stability, multiple correlations, humidity, shear strength parameters, index properties.

1. Introducción

El estudio de la estabilidad de taludes permite establecer medidas de prevención y control que ayuda reducir los niveles de amenaza y riesgo al deslizamiento.

Partiendo que en el medio local es común que se presenten fallas por corte en los taludes y laderas que normalmente son provocados por el incremento de la humedad del suelo debido a épocas en donde la precipitación es variable (verano - invierno) ya que el agua se infiltra, por consiguiente, modifica su resistencia al corte.

En tal sentido se genera una incertidumbre al momento de estimar los parámetros de resistencia al corte a utilizar para el cálculo de la estabilidad de taludes y su correspondiente factor de seguridad, dado que la cantidad de agua intersticial puede que no corresponda al estado más crítico.

El estudio realizado permitió obtener ecuaciones que servirán como una alternativa de cálculo en cuanto se puede estimar la reducción de cohesión (c) y del ángulo de fricción interna del suelo (ϕ) a utilizar en el análisis de estabilidad de taludes para determinado incremento de humedad.

Cabe mencionar que para hacer posible la investigación se ejecutó trabajo de campo de donde se extrajo un bloque de suelo para cada sitio de estudio.

Se ejecutaron ensayos de laboratorio Triaxial UU, se realizó un programa de pruebas en el cual se incrementó la humedad de las muestras del suelo para diferentes tiempos 12:00 h, 24:00 h y 36:00 h de circulación de agua con porcentajes desde 11.25% (humedad natural) hasta 28.48%.

También se realizó la clasificación SUCS que implica la granulometría por lavado, contenido de humedad, límite líquido y límite plástico. Adicionalmente se realizó el ensayo de gravedad específica.

Para la elaboración de las correlaciones lineales múltiples con los resultados que se obtuvieron en laboratorio se utilizó un software estadístico que además permite realizar el análisis factorial ANOVA que determina los parámetros representativos que intervienen en

las variables independientes en función de la variable dependiente.

2. Materiales y Métodos

2.1. Materiales

2.1.1. Ubicación

La selección de muestras se llevó a cabo en dos sitios dentro del Distrito Metropolitano de Quito (Vía Nono sector Plan Techo y Vía Nanegalito sector Los Dos Puentes) ubicados en los siguientes mapas georreferenciados figura 1 y 2 respectivamente.

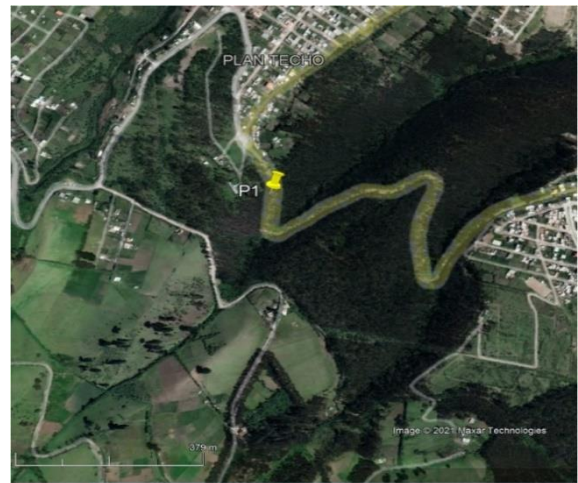


Figura 1. Vía Nono sector Plan Techo.

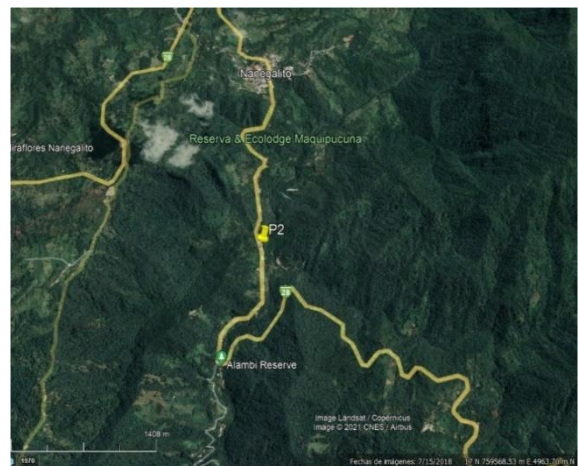


Figura 2. Vía Nanegalito sector Los Dos Puentes.

Las coordenadas de los sitios en donde se realizó el trabajo de campo para la extracción de los bloques de suelo se encuentran en el sistema UTM WGS84 como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de los puntos de extracción de los bloques de suelo.

Nº BLOQUE	CIUDAD	UTM WGS84	
1	Quito	E: 0774547	N: 9988399
2	Quito	E: 0758335	N: 0004727

2.2 Metodología

2.2.1. Obtención de muestras

Las muestras de bloque de suelo fueron extraídas mediante la realización de calicatas a cielo abierto de acuerdo a los parámetros establecidos en la norma (ASTM D4220) [7]. Se talló un prisma de 40x40x40 cm, posteriormente se selló adecuadamente con embalaje no absorbente para que conserve su humedad.

En la figura 3 y 4 se observa la extracción de las muestras de bloque de suelo de los 2 sitios.



Figura 3. Extracción bloque de suelo ubicada Vía Nono sector Plan Techo



Figura 4. Extracción de bloque de suelo ubicada Vía Nanegalito sector Los Dos Puentes.

2.2.2. Caracterización

Una vez que se obtuvieron las muestras de bloques de suelo de los sitios antes mencionados se las transportaron al laboratorio como muestras inalteradas para realizar los ensayos de acuerdo a normas que se mencionan en la tabla 2.

Tabla 2. Ensayos para caracterización del suelo y normas.

	ENSAYO	NORMA
LÍMITES DE CONSISTENCIA	Límite Líquido	ASTM D-4318
	Límite Plástico	ASTM D-4318
TAMIZADO MECÁNICO	Granulometría	ASTM D-4531
PROPIEDADES ÍNDICE	Densidad Natural	ASTM D-184
	Gravedad específica	ASTM D-184
	Humedad	ASTM-2216

2.2.3. Clasificación SUCS

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se realizó cumpliendo la norma ASTM D 2487 [1].

Llumiquinga / Influencia del agua intersticial en los parámetros de resistencia al corte (Triaxial UU), evaluado en dos sitios del Distrito Metropolitano de Quito, aplicado a la estabilidad de taludes en suelos parcialmente saturados en términos de esfuerzos totales.

- Una vez calculados los porcentajes de grava, arena, finos, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, se procede a clasificar el suelo, utilizando la metodología indicada en las figuras 5 y 6.

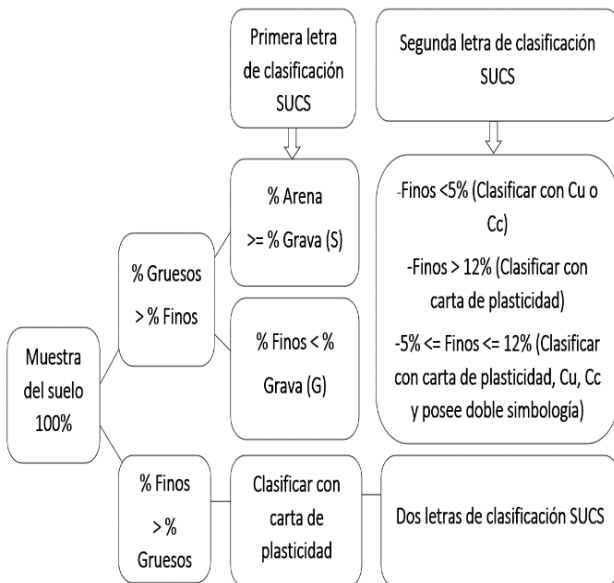


Figura 5. Procedimiento de clasificación SUCS [18].

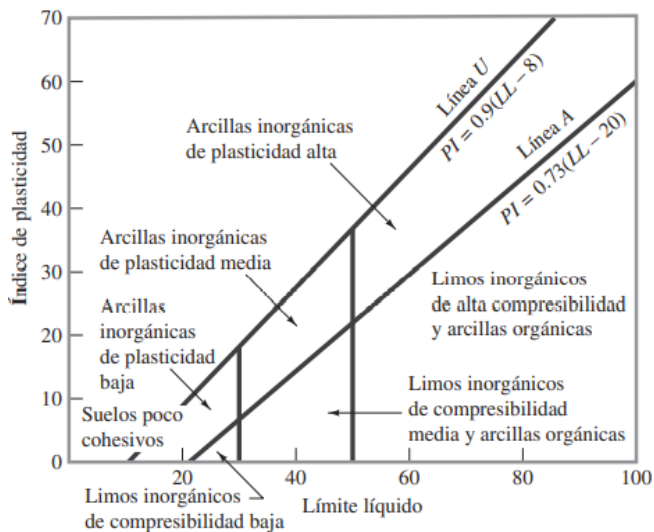


Figura 6. Carta de plasticidad (SUCS) [9].

2.2.4. Ensayo de resistencia al corte

Se define como la resistencia interna por área unitaria que la masa del suelo ofrece para resistir la falla por los esfuerzos y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de él [8].

2.2.4.1 Ensayo Triaxial UU (no consolidado no drenado)

Basado en la norma ASTM D 2850[6]. Este ensayo permitió determinar los parámetros de resistencia al corte (c , ϕ), en esta investigación se utilizó el equipo triaxial que se ilustra en la figura 7.



Figura 7. Equipo triaxial UU utilizado.

- Se realizaron 4 ensayos triaxiales por cada sitio (Vía Nono sector Plan Techo – Vía Nanegalito sector Los Dos Puentes).
- Se ensayaron 24 probetas (muestras) cilíndricas previamente talladas aproximadamente de 3.5 cm de diámetro y relación altura-diámetro aproximada de 2.
- En la base del pedestal del equipo se colocó una placa porosa, papel filtro y la muestra de suelo impermeabilizada con el uso de una membrana y bandas elásticas para su sellado.
- Se procedió a ubicar la muestra en la cámara triaxial bajo una mínima presión con las válvulas de salida abiertas, se hizo circular agua desairada a través de la probeta, esta modalidad de circulación del agua desairada se explica por una diferencia de cota entre la superficie del

estanque de agua desaireada y las líneas de salida en la cámara triaxial.

- Primero se hizo circular solo en la zona inferior de la probeta, luego desde abajo hacia arriba, para finalmente hacer circular solo en la parte superior. Esta técnica busca saturar las zonas perimetrales y el avance homogéneo del frente de saturación desde abajo.
- Se aumentó el porcentaje de humedad para diferentes tiempos como se detalla en la tabla 4.
- Se procedió a ensayar las muestras para diferentes esfuerzos de confinamiento en este caso para 0.5-1.00 y 2.00 kg/cm².

Tabla 4: Incremento de humedad en muestras de suelo para diferentes tiempos.

Vía Nono sector Plan Techo		
Muestra	ω %	Tiempo (horas)
NO1	11.25	-
NO2	15	12
NO3	22.11	24
NO4	25.78	36
Vía Nanegalito Sector Los Dos Puentes		
Muestra	ω %	Tiempo (horas)
NA1	16.28	-
NA2	18.83	12
NA3	25.77	24
NA4	28.49	36



Figura 8. Muestras cilíndricas sitio Vía Nono sector Plan Techo.



Figura 9. Muestras cilíndricas sitio Nanegalito Sector los Dos Puentes.

2.2.5. Análisis de Regresión lineal

Es una técnica estadística que se encarga de estimar la relación entre las variables dependientes y un conjunto de variables explicativas independientes con la finalidad de obtener una ecuación que las relacione [8].

Variable dependiente: Es el factor más importante, el cual se está tratando de predecir será la reducción de los parámetros de resistencia al corte [8].

Variables independientes: También llamado valores observados (datos de los ensayos de laboratorio), representa las variables que se usa para explicar la variación en la variable dependiente.

En la presente investigación las variables dependientes (valores predichos) representan reducción de cohesión (R_c) y reducción del ángulo de fricción (R_ϕ), en tanto que las variables independientes (valores observados) son los resultados de los ensayos de laboratorio (parámetros de resistencia al corte, densidad del suelo y ensayos de clasificación SUCS).

Parámetros de regresión son:

- Intercepto: Indica el valor promedio de la variable de respuesta Y (variable dependiente) cuando las X (variables independientes) son cero [11].
- Coeficientes de regresión: Denota el número de unidades que aumentará la

Llumiquinga / Influencia del agua intersticial en los parámetros de resistencia al corte (Triaxial UU), evaluado en dos sitios del Distrito Metropolitano de Quito, aplicado a la estabilidad de taludes en suelos parcialmente saturados en términos de esfuerzos totales.

variable Y (dependiente) por efecto del cambio de la variable X (independiente).

- Error estándar: Mide la confiabilidad de la ecuación de regresión lineal múltiple, cuanto mayor es el error de estimación más grandes serán las dispersiones de los puntos alrededor de la línea de regresión, esto es mientras más cercano este a cero se puede decir que el estimador es perfecto.
- p-value: Define la importancia de los efectos de las variables independientes con respecto a las variables dependientes, cuando los valores son menores o iguales a 0.05 son estadísticamente significativos.[18]
- R- Cuadrado ajustado: Se emplea en la regresión múltiple con el fin de distinguir el grado de intensidad o efectividad que cuentan las variables independientes, varía de 0 a 1. Los valores cercanos a 1 tendrán un mayor ajuste. [10]

Se desarrolló un modelo de regresión lineal múltiple que sigue la siguiente forma [12].

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i + \varepsilon \quad (1)$$

Dónde:

- Y: Variable dependiente (predichos) reducción de cohesión, reducción ángulo de fricción.
- β_i : Parámetros a estimar (coeficientes de ajuste de correlación).
- X_i : Variables independientes (valores observados) parámetros de resistencia al corte, peso específico del suelo, datos de clasificación SUCS.
- ε : Representa el residuo o error.

Los datos utilizados para realizar las correlaciones se detallan en el anexo 2.

2.2.6. Análisis de estabilidad de taludes por el método de Bishop simplificado

Bishop analiza la estabilidad de un talud con superficie de falla del tipo circular, tomando en cuenta el efecto de las fuerzas entre dovelas. [9]

Se realizó un algoritmo en cual se evalúa el factor de seguridad mediante integrales definidas entre el inicio (X_i) y final del círculo de falla (X_f) que definen la superficie de rotura entre estos límites, se evalúan las fuerzas de resistencia al corte y fuerzas deslizantes.

La masa del suelo del círculo de falla deslizante se evalúa en una franja de ancho (dx).

Mediante la representación del diagrama de cuerpo libre se obtiene de una forma diferencial las ecuaciones de equilibrio de fuerzas y de momentos, encontrando la expresión que permite determinar el FS de la superficie de falla.

Se presenta en las figuras 10 y 11 el círculo de falla y el diagrama de cuerpo libre en el plano de ejes x-y.

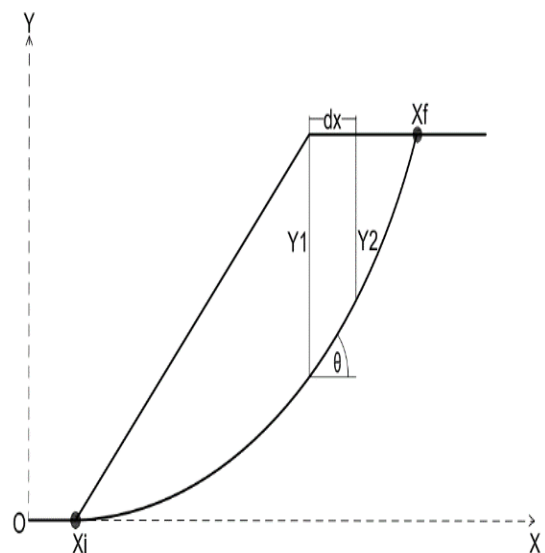


Figura 10. Círculo de falla.

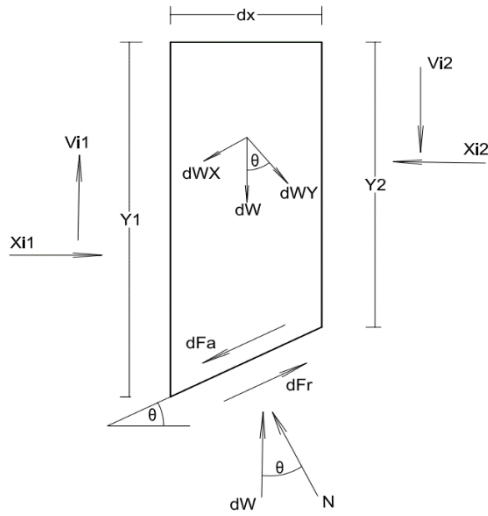


Figura 11. Diagrama de cuerpo libre de franja dx.

Donde:

- dx: Diferencial dx de la franja analizada.
- dw: Diferencial de peso.
- dwx: Diferencial de peso en “x”.
- dwy: Diferencial de peso en “y”.
- Y₁: Altura a la izquierda de la franja analizada.
- Y₂: Altura a la derecha de la franja analizada.
- dFr: Diferencial de la fuerza resistente.
- dFa: Diferencial de la fuerza deslizante.
- N: Fuerza normal.
- Vi: Fuerza cortante en las caras laterales del elemento diferencial.
- Xi: Fuerza normal en las caras laterales del elemento diferencial.

El diferencial (dx) representa una distancia muy pequeña de la franja de suelo analizado, que tendrá un diferencial de peso que se puede descomponer en “x” que tiene una dirección paralela a la base del elemento diferencial, y en “y” que tiene dirección perpendicular la base del elemento diferencial.

El ángulo θ va ser variable y representa el ángulo de la superficie de falla en cada punto que la constituye, por tanto, se lo trata a nivel diferencial ya que no es constante y se lo puede calcular como se muestra en la ecuación 3.

$$\frac{dc(x)}{dx} = \tan\theta \quad (2)$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{dc(x)}{dx}\right) \quad (3)$$

Donde:

- dc: Derivada de la función círculo de falla

La altura a la izquierda y derecha como se ilustra en la ecuación 4, va ser igual debido a que su diferencial (dx) es un número que tiende a cero.

$$Y_1 = Y_2 = Y \quad (4)$$

2.2.6.1 Fuerza deslizante

De la expresión de Bishop Simplificado se tiene que:

$$Fa = w * \text{sen}\theta \quad (5) [8]$$

Al evaluar como elemento diferencial considerando 1 metro de profundidad se tiene:

$$dFa = dw * \text{sen}\theta * dx \quad (6)$$

$$dw = \gamma * Y * \text{sen}\theta * dx \quad (7)$$

$$Fa = \int_{Xi}^{Xf} (\gamma * Y * \text{sen}(\theta)) dx \quad (8)$$

2.2.6.2 Fuerza resistente

De la expresión de Bishop Simplificado se tiene que:

$$Fr = (c * b + w * \tan\varphi) * \frac{1}{m\theta} \quad (9) [8]$$

Al evaluar como elemento diferencial considerando 1 metro de profundidad se tiene:

$$dFr = (c * dx + dw * \tan\varphi) * \frac{1}{m\theta} * dx \quad (10)$$

$$m\theta = \cos\theta + \frac{\tan\varphi * \text{sen}\theta}{FSi} \quad (11)$$

$$Fr = \int_{Xi}^{Xf} (c + \gamma * Y * \tan\varphi) * \frac{1}{m\theta} * dx \quad (12)$$

Llumiquinga / Influencia del agua intersticial en los parámetros de resistencia al corte (Triaxial UU), evaluado en dos sitios del Distrito Metropolitano de Quito, aplicado a la estabilidad de taludes en suelos parcialmente saturados en términos de esfuerzos totales.

2.2.6.3 Factor de seguridad

$$Fs = \frac{\int_{X_i}^{X_f} (c + \gamma * Y * \tan \varphi) * \frac{1}{m \theta} * dx}{\int_{X_i}^{X_f} (\gamma * Y * \sin(\theta)) dx} \quad (13)$$

Donde:

- Fs: Factor de seguridad.
- c: Cohesión.
- φ : Ángulo de fricción interna del suelo.
- Y: Altura del elemento diferencial de la franja analizada.
- γ : Peso específico del suelo.
- θ : Ángulo de la superficie de falla.
- Xi: Límite de integración del inicio del círculo de falla.
- Xf: Límite de integración del final del círculo de falla.

Debido a que el factor de seguridad se encuentra en los dos lados de la expresión (13), se debe realizar un proceso iterativo, de prueba y error para encontrar el factor de seguridad.

2.2.7 Programación

Se programó un algoritmo que realiza un proceso iterativo con los datos de entrada de la superficie de falla del talud (X_{io} , X_{fo} , α_o), una vez efectuados los cálculos se obtiene el factor de seguridad más crítico y la superficie de rotura que se representa a través de un gráfico.

2.2.7.1 Geometría del talud

Para realizar la programación de la superficie del talud previamente se establece puntos referenciales de la geometría del talud ($X_1 Y_1$, $X_2 Y_2$, $X_3 Y_3$, $X_4 Y_4$) los puntos referenciales se ilustran en la figura 12.

Donde:

- $X_1 Y_1$, $X_2 Y_2$: Representan los pares ordenados del pie del talud.
- $X_3 Y_3$, $X_4 Y_4$: Representan los pares ordenados de la corona del talud.

2.2.7.2 Datos del círculo de falla

Se definen los datos de entrada para realizar el proceso de iteración X_{io} , X_{fo} , α_o .

Donde:

- X_{io} : Representa el inicio del círculo de falla.
- X_{fo} : Representa el final del círculo de falla.
- α_o : Ángulo máximo de inicio del círculo de falla igual al ángulo de rotura en estado activo del suelo.

$$\alpha_o = 45 + \frac{\varphi}{2}$$

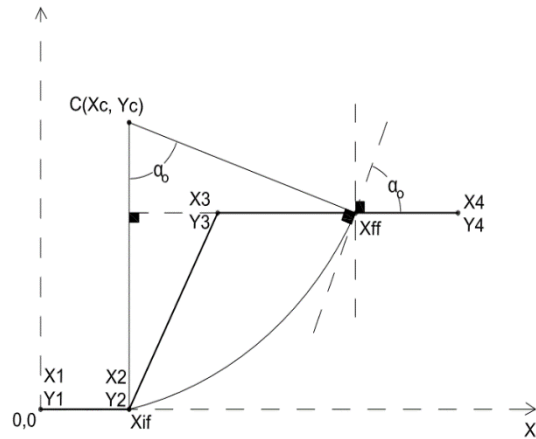


Figura 12. Puntos referenciales del talud.

2.2.7.3 Función del talud

Se definen las siguientes funciones para la representación gráfica del talud como se ilustra en la figura 12.

La función $f_1(x)$ entre X_1 - X_2 representa el pie del talud.

$$f_1(x) = 0 \quad (14)$$

La función $f_2(x)$ entre X_2 - X_3 representa la pendiente del talud.

$$f_2(x) = m * x + b \quad (15)$$

La función $f3(x)$ entre X_3 - X_4 representa la corona del talud.

$$f(x) = Y_3 \quad (16)$$

Definida las funciones se programa el algoritmo que representa la superficie del talud.

```

t(x) = if x ≤ X2
      || f1(x)
      else
      || if X2 < x ≤ X3
      || || f2(x)
      || else
      || || f3(x)

```

2.2.7.4 Función del círculo de falla

Para la obtención de esta función se forma un triángulo isósceles en donde sus lados iguales son el radio del círculo de falla, la base representa la cuerda que está formada entre el inicio y el final del círculo de falla.

En la figura 13. Se detalla la cuerda y los ángulos que genera el círculo de falla y el talud.

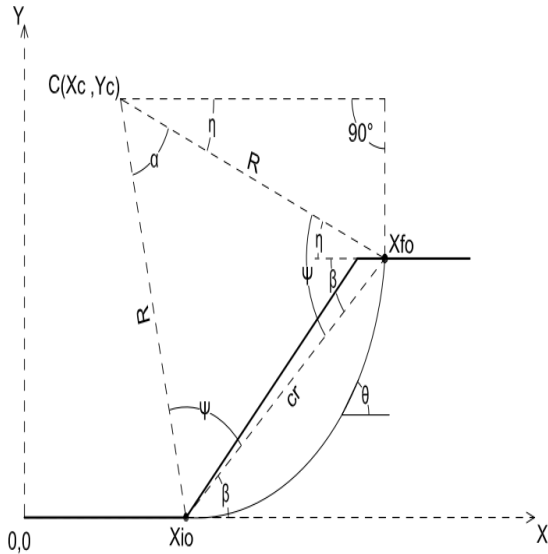


Figura 13. Diagrama función círculo de falla.

Se definen las siguientes expresiones para obtener la función de la cuerda (cr).

$$Yi = t(Xi) \quad (17)$$

$$Yf = t(Xf) \quad (18)$$

$$cr(Xf, Xi) = \sqrt{(Xf - Xi)^2 + (Yf(Xf) - Yi(Xi))^2} \quad (19)$$

Mediante la expresión del ángulo de rotura máxima α se calcula el ángulo Ψ , β , η para posteriormente usando la ley de senos calcular el radio (R), además el centro del círculo de falla (Xc , Yc) como se detalla en las siguientes expresiones.

$$\psi(\alpha) = \frac{180^\circ - \alpha}{2} \quad (20)$$

$$\beta(Xf, Xi) = \text{atan} \left(\frac{Yf(Xf) - Yi(Xi)}{Xf - Xi} \right) \quad (21)$$

$$\eta(\alpha, Xf, Xi) = \psi(\alpha) - \beta(Xf, Xi) \quad (22)$$

$$R(\alpha, Xf, Xi) = cr(Xf, Xi) * \frac{\sin(\psi(\alpha))}{\sin(\alpha)} \quad (23)$$

$$Xc(\alpha, Xf, Xi) = Xf - R(\alpha, Xf, Xi) * \cos(\eta(\alpha, Xf, Xi)) \quad (24)$$

$$Yc(\alpha, Xf, Xi) = Yf(Xf) + R(\alpha, Xf, Xi) * \sin(\eta(\alpha, Xf, Xi)) \quad (25)$$

Definidas las ecuaciones del centro y radio se establece la función del círculo de falla.

$$C(x, \alpha, Xf, Xi) = -\sqrt{R(\alpha, Xf, Xi)^2 - (x - Xc(\alpha, Xf, Xi))^2} + Yc(\alpha, Xf, Xi) \quad (26)$$

Donde:

- R : Radio del círculo de falla.
- Xc : Centro en X del círculo de falla.
- Yc : Centro en Y del círculo de falla.
- Xi : Límite de integración del inicio del círculo de falla.
- Xf : Límite de integración del final círculo de falla.

2.2.7.5 Ángulo Círculo de falla

Establecida la función del círculo de falla se procede a evaluar el ángulo (θ) que corresponderá a cada uno de los ángulos formados por la horizontal y la línea tangente a dichos puntos en la superficie de falla, como se indica en las funciones.

Llumiquinga / Influencia del agua intersticial en los parámetros de resistencia al corte (Triaxial UU), evaluado en dos sitios del Distrito Metropolitano de Quito, aplicado a la estabilidad de taludes en suelos parcialmente saturados en términos de esfuerzos totales.

$$\theta(x, \alpha, Xf, Xi) = \text{atan} \left(\frac{d}{dx} C(x, \alpha, Xf, Xi) \right) \quad (27)$$

$$m\theta(x, \alpha, Xf, Xi, Fsi) = \cos(\theta(x, \alpha, Xf, Xi)) + \tan\varphi * \sin(\theta(x, \alpha, Xf, Xi)) / Fsi \quad (28)$$

2.2.7.6 Altura del elemento diferencial

Es la diferencia de niveles entre la función del talud y el círculo de falla.

$$Y(x, \alpha, Xf, Xi) = t(x) - C(x, \alpha, Xf, Xi) \quad (29)$$

2.2.7.7 Factor de seguridad

Se evaluó la expresión (30) y se realizó un proceso iterativo a partir del factor de seguridad inicial, se determinó el factor de seguridad crítico (mínimo valor) para los datos de entrada cómo se ilustra en la siguiente expresión.

$$FSO(\alpha, Xf, Xi, Fsi) = \frac{\int_{Xi}^{Xf} C + \gamma * Y(x, \alpha, Xf, Xi) * \tan\varphi * \frac{1}{m\theta(x, \alpha, Xf, Xi, Fsi)} dx}{\int_{Xi}^{Xf} \gamma * Y(x, \alpha, Xf, Xi) * \sin(\theta(x, \alpha, Xf, Xi)) dx}$$

(30)

Se planteó un error tolerable de 0.0003 entre el factor de seguridad inicial y el factor de seguridad calculado para que el algoritmo siga iterando hasta que cumpla la condición que se presenta en la siguiente expresión.

$$FSQ := \text{while abs}(FSO(\alpha, Xfo, Xio, Fsi) - Fsi) > 0.0003$$

$$\left\| \begin{array}{l} Fsi \leftarrow FSO(\alpha, Xfo, Xio, Fsi) \\ FSn \leftarrow FSO(\alpha, Xfo, Xio, Fsi) \\ FSn \end{array} \right\|$$

Donde:

- Fsi: Factor de seguridad inicial de entrada.
- FSo: Factor de seguridad calculado.
- FSn: Factor de seguridad iterado.
- FSQ: Factor de seguridad crítico.
- Xio: Dato de entrada inicio del círculo de falla.

- Xfo: Dato de entrada final del círculo de falla.
- α_0 : Dato de entrada del ángulo máximo de inicio del círculo de falla.

2.2.7.8 Iteración de la posición inicial del círculo de falla

Calculado el factor de seguridad crítico (FSQ) se programó un algoritmo en el que se itera el dato de entrada del inicio del círculo de falla (Xio), variando su posición hasta determinar el factor de seguridad mínimo la posición crítica en que inicia la superficie de rotura.

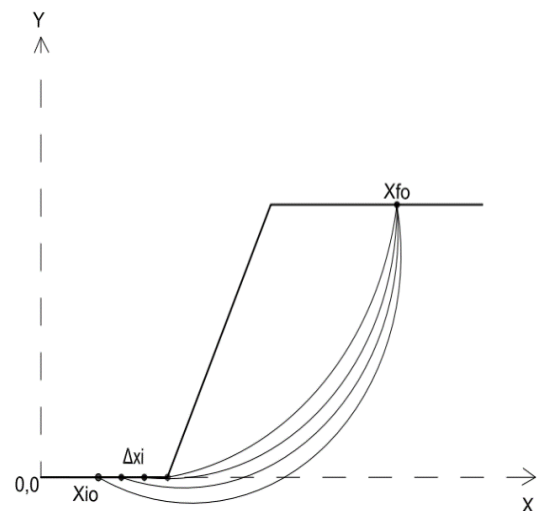


Figura 14. Diagrama variación del inicio círculo de falla.

$$FS1 := \left\| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0 .. nxi \\ Xiof_i \leftarrow Xio + \Delta xi * i \\ FSi_i \leftarrow FSO(\alpha, Xfo, Xiof_i, FSQ) \\ FSi \end{array} \right\|$$

$$I = \min(FS1) \quad (31)$$

$$If = \text{match}(I, FS1) \quad (32)$$

$$Xif = Xio + \Delta xi * If \quad (33)$$

Donde:

- i: Contador de iteraciones.
- nxi: Número de iteraciones.

- Δx_i : Variación de la posición inicial del círculo de falla.
- X_{i0} : Dato de entrada del inicio del círculo de falla.
- $FS1$: Factor de seguridad calculado.
- FS_i : Factor de seguridad iterado.
- I : Factor de seguridad mínimo.
- I_f : Número de iteración del factor de seguridad mínimo.
- X_{if} : Posición inicial crítica del inicio círculo de falla.

2.2.7.9 Iteración de la posición final del círculo de falla

Definido la posición crítica del inicio del círculo de la falla (X_{if}) y el factor de seguridad que en este se produce, se programó un algoritmo en el que se itera el dato de entrada del final del círculo de falla (X_{fo}), variando su posición hasta determinar el factor de seguridad mínimo y la posición crítica en que finaliza la superficie de rotura.

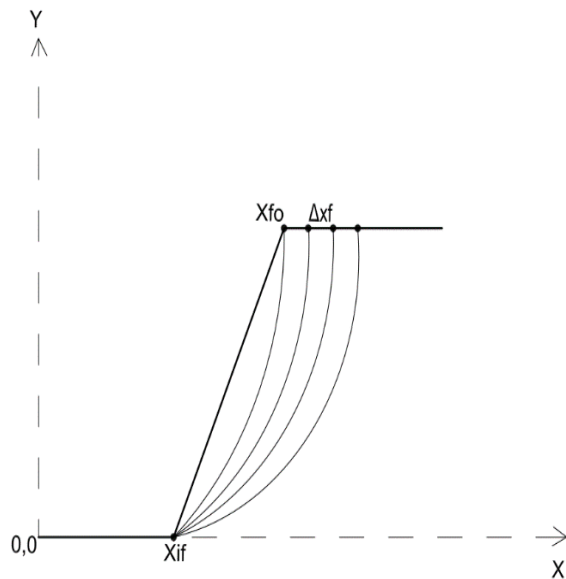


Figura 15. Diagrama variación del final del círculo de falla.

```

FS2 := || for j ∈ 0 .. nxf
      || Xfofj ← Xfo + Δxf · j
      || FSjj ← FSo(αo, Xfofj, Xif, I)
      || FSj
  
```

$$F = \min(FS2) \quad (34)$$

$$Ff = \text{match}(F, FS2) \quad (35)$$

$$Xff = Xfo + \Delta Xf * Ff \quad (36)$$

Donde:

- j : Contador de iteraciones.
- nxf : Número de iteraciones.
- Δx_f : Variación de la posición final del círculo de falla.
- X_{fo} : Dato de entrada del final del círculo de falla.
- $FS2$: Factor de seguridad calculado.
- FS_j : Factor de seguridad iterado.
- F : Factor de seguridad mínimo.
- I_f : Número de iteración del factor de seguridad mínimo.
- X_{ff} : Posición final crítica del círculo de falla.

2.2.7.10 Iteración del ángulo máximo de rotura del círculo de falla

Definido la posición crítica del final del círculo de la falla (X_{ff}) y el factor de seguridad que en este se produce, se programó un algoritmo en el que se itera el dato de entrada del ángulo de inicio máximo del círculo de falla (α_o), variando su posición hasta determinar el factor de seguridad y el ángulo máximo en el que finaliza la superficie de rotura.

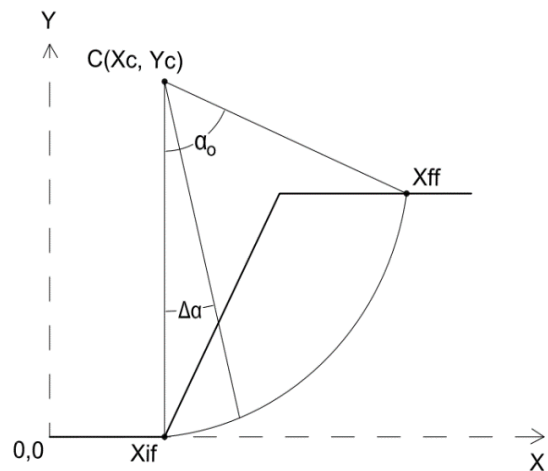


Figura 16. Diagrama variación del ángulo de rotura del círculo de falla.

Llumiquinga / Influencia del agua intersticial en los parámetros de resistencia al corte (Triaxial UU), evaluado en dos sitios del Distrito Metropolitano de Quito, aplicado a la estabilidad de taludes en suelos parcialmente saturados en términos de esfuerzos totales.

$$FS3 := \left\| \begin{array}{l} \text{for } k \in 0..n\alpha \\ \alpha_{\omega k} \leftarrow \alpha_0 + \Delta\alpha \cdot k \\ FSk_k \leftarrow FSo(\alpha_{\omega k}, X_{ff}, X_{if}, F) \\ FSk \end{array} \right\|$$

$$FS = \min(FS3) \quad (37)$$

$$Rf = \text{match}(R, FS3) \quad (38)$$

$$\alpha_{ff} = \alpha_0 + \Delta\alpha * Rf_0 \quad (39)$$

Donde:

- k: Contador de iteraciones.
- nα: Número de iteraciones.
- Δα: Variación del ángulo de rotura del círculo de falla.
- α₀: Dato de entrada del ángulo de inicio máximo del círculo de falla.
- FS3: Factor de seguridad calculado.
- FSk: Factor de seguridad iterado.
- FS: Factor de seguridad mínimo.
- Rf: Número de iteración del factor de seguridad mínimo.
- α_{ff}: Ángulo de rotura del círculo de falla.

3. Resultados y Discusión

Se presenta un resumen de los resultados de cada ensayo triaxial UU, análisis de las correlaciones de reducción del ángulo de fricción y reducción de cohesión con el aumento de humedad, además resultados del cálculo del factor de seguridad y la influencia de la humedad en su reducción.

3.1. Ensayos para caracterización de los suelos

De acuerdo a los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio los mismos que al realizar la clasificación SUCS, definen que para el sitio vía Nono sector Plan Techo se tiene un suelo de tipo CL (Arcilla limo arenosa), en tanto que para el sitio vía Nanegalito se tiene un suelo de tipo ML (Limo arenosa).

Se presenta en la tabla 5 los resultados de caracterización de los suelos estudiados.

Tabla 5. Resultados de ensayos de caracterización de suelos.

	Vía Nono	Vía Nanegalito
Clasificación SUCS	CL	ML
% Grava	0	0
% Arena	42	46
% Finos	58	54
Límite Líquido	29	30
Límite Plástico	20	27
Índice de Plasticidad	9	3
Contenido de Humedad	13.2	16.5
Gravedad Específica	2.716	2.674

3.2. Ensayo triaxial

3.2.1 Parámetros de resistencia al corte

Tabla 6. Resultados de laboratorio parámetros de resistencia al corte.

Vía Nono sector Plan Techo				
Muestra	φ°	c (kg/cm ²)	ω (%)	Δω (%)
NO1	26	2.1	11.25	0
NO2	18	0.9	15	3.74
NO3	14	0.25	22.11	10.86
NO4	7.5	0.2	25.78	14.52
Vía Nanegalito Sector Los Dos Puentes				
Muestra	φ°	c (kg/cm ²)	ω (%)	Δω (%)
NA1	34	0.42	16.28	0
NA2	22	0.38	18.83	2.55
NA3	20	0.28	25.77	9.49
NA4	18	0.19	28.49	12.2

3.3. Análisis estadístico

Con los datos que se obtuvieron en laboratorio (valores observados). Se procede a evaluar la variación de los parámetros de resistencia al corte, además de la humedad, peso específico y grado de saturación.

3.3.1 Análisis de regresión lineal múltiple.

3.3.1.1 Reducción del ángulo de fricción.

Los resultados del modelo realizado se detallan en las tablas 7,8 y 9.

Tabla 7. Resumen de resultados del modelo de regresión lineal múltiple para la variable predicha reducción del ángulo de fricción.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Constante	-184.943	42.071	-4.39596	0.0046
φ°	1.1635	0.121849	9.54873	0.0001
ω	-0.384444	0.259141	-1.48353	0.1885
$\Delta\omega$	-29.481	10.1716	-2.89835	0.0274
ΔS	-7.50891	2.32673	-3.22724	0.018
γ	92.5632	24.4192	3.79059	0.0091
$\Delta\gamma$	3714.15	1200.63	3.0935	0.0213
IP	0.41162	0.0890794	4.62082	0.0036

Donde:

- φ : Ángulo de fricción interna del suelo (grados).
- ω : Humedad inicial (%).
- $\Delta\omega$: Variación de humedad.
- ΔS : Variación del grado de saturación.
- γ : Peso específico húmedo inicial del suelo (gr/cm^3).
- $\Delta\gamma$: Variación del peso específico húmedo del suelo (gr/cm^3).
- IP: Índice de plasticidad.

Análisis:

En la tabla 7 se observa que los valores-p son menores a 0.05 lo cual establece que las

variables son significativamente estadísticas para el modelo de regresión lineal múltiple.

Se analizó la variable dependiente ángulo de fricción (φ), siendo la más significativa para el modelo ya que posee un valor $-p$ de 0.0001.

Tabla 8. Análisis de varianza para la variable predicha reducción del ángulo de fricción.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	422.854	7	60.408	36.170	0.0002
Residuo	10.0206	6	1.670		
Total (Corr.)	432.875	13			

En el modelo reducción del ángulo de fricción ($R\varphi$) como se ilustra en la tabla 8, el valor de valor-p es de 0.0002 es menor que 0.05, por lo tanto, existe una relación significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 9. Coeficientes de correlación R-cuadrado para la variable predicha reducción del ángulo de fricción.

Modelo	R-cuadrado	R-cuadrada (ajust para g.1)	Error estándar de la estimación	Error absoluto medio
1	97.6851	94.9844	1.29232	0.692781

El resultado del coeficiente de correlación (R-cuadrado ajustado) es de 94.98% de efectividad que tienen las variables independientes en predecir la reducción del ángulo de fricción lo cual implica una correlación buena.

3.3.1.2 Reducción de cohesión.

Los resultados del modelo realizado se detallan en las tablas 10,11 y 12.

Llumiquinga / Influencia del agua intersticial en los parámetros de resistencia al corte (Triaxial UU), evaluado en dos sitios del Distrito Metropolitano de Quito, aplicado a la estabilidad de taludes en suelos parcialmente saturados en términos de esfuerzos totales.

Tabla 10. Resumen de resultados del modelo de regresión lineal múltiple para la variable predicha reducción de cohesión.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor-P
Constante	-3.5448	2.3322	-1.51994	0.189
ϕ	0.00385491	0.00898754	0.428917	0.6858
c	0.818448	0.0872644	9.37895	0.0002
$\Delta\omega$	-0.427229	0.187752	-2.2755	0.0719
ΔS	0.135287	0.0538675	2.51148	0.0537
γ	1.83494	1.19445	1.53623	0.1851
IP	-0.04288	0.0238778	-1.79581	0.1325

Donde:

- ϕ : Ángulo de fricción interna del suelo (grados).
- c: Cohesión (kg/cm^2).
- $\Delta\omega$: Variación de humedad.
- ΔS : Variación del grado de saturación.
- γ : Peso específico húmedo inicial del suelo (gr/cm^3).
- IP: Índice de plasticidad.

Análisis:

Se analizó la variable dependiente cohesión, siendo la más significativa para el modelo ya que posee un valor $-p$ de 0.0002.

Tabla 11. Análisis de varianza para variable predicha reducción de cohesión.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5.2225	6	0.870416	96.71	0.0001
Residuo	0.0450026	5	0.009001		
Total (Corr.)	5.2675	11			

El modelo reducción de cohesión (RC) cómo se ilustra en la tabla 11, el valor de valor-p es de 0.0001 es menor que 0.05, existe una relación significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 12. Coeficientes de correlación R -cuadrado para la variable predicha reducción de cohesión.

Modelo	R- cuadrado	R- cuadrada (ajust para g.l)	Error estándar de la estimación.	Error absoluto medio
1	99.1457	98.1204	0.094871	0.0465746

El resultado del coeficiente de correlación (R-cuadrado ajustado) es de 98.12% de efectividad que tienen las variables independientes en predecir la reducción de la cohesión lo cual implica una correlación buena.

Las correlaciones obtenidas para determinar las variables $R\phi$ y Rc se detallan a continuación en la tabla 13.

Tabla 13. Correlaciones obtenidas.

Reducción Ángulo Fricción
$R\phi = -184.943 + 1.1635*\phi - 0.384444*\omega - 29.481*\Delta\omega - 7.50891*\Delta S + 92.5632*\gamma + 3714.15*\Delta\gamma + 0.41162*IP$
Reducción Cohesión
$Rc = -3.5448 + 0.00385491*\phi + 0.818448*c - 0.427229*\Delta\omega + 0.135287*\Delta S + 1.83494*\gamma - 0.04288*IP$

Donde:

- $R\phi$: Reducción Ángulo de fricción interna del suelo (grados).
- ϕ : Ángulo de fricción interna del suelo (grados).
- c: Cohesión (kg/cm^2)
- ω : Humedad inicial (%).
- $\Delta\omega$: Variación de humedad.
- ΔS : Variación del grado de saturación (%).
- γ : Peso específico inicial del suelo (gr/cm^3).

- $\Delta\gamma_h$: Variación del peso específico del suelo (gr/cm^3).
- IP: Índice de plasticidad (valor observado)
- Rc: Reducción de cohesión (kg/cm^2).

3.3.1.3 Gráficas de valores predichos vs. observados.

Los gráficos de los modelos al tener una línea de tendencia con una pendiente cercana a 45° , se pueden interpretar que existe una buena correlación entre los datos observados (datos de laboratorio), con los calculados con las correlaciones, (valores predichos $R\phi$ y Rc) ya que tienen una tendencia sin mayor dispersión.

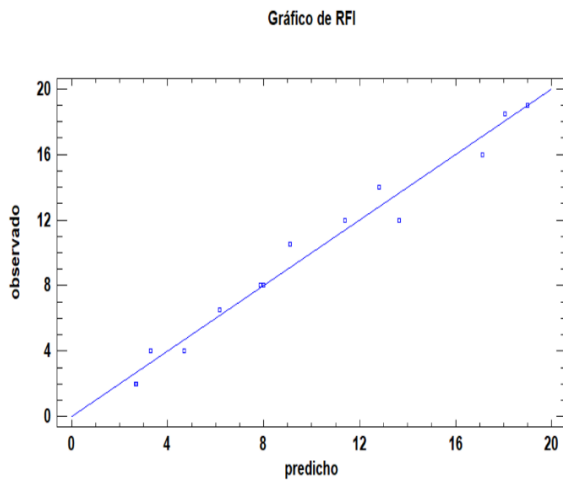


Figura 17. Gráfica observados vs predicho $R\phi$.

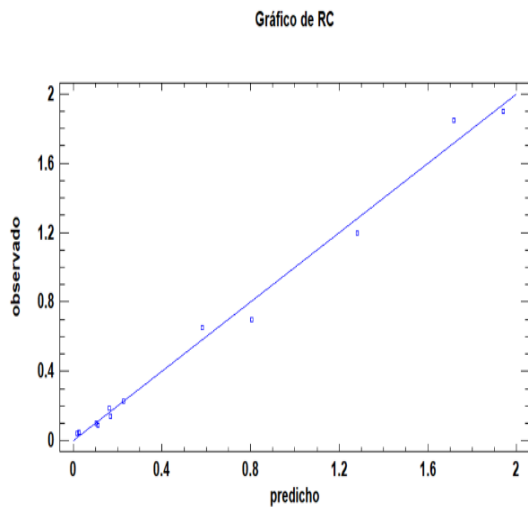


Figura 18. Gráfica observados vs predicho Rc.

3.3.1.4 Error entre los valores observados y los valores calculados

Este porcentaje permite determinar la imprecisión entre ϕ_{lab}, ϕ_{cal} y c_{lab}, c_{cal} los cuales se calculan con:

$$\phi_{cal} = \phi_{lab} - R\phi \quad (40)$$

$$c_{cal} = c_{lab} - Rc \quad (41)$$

Tabla 14. Resultados del ángulo de fricción de laboratorio y el ángulo de fricción calculado con su respectivo error.

Muestra	ϕ° (Laboratorio)	ϕ° (Calculado)	Error (%)
NO2	18	18	0.0
NO3	14	11.1	20
NO4	7.5	7.5	0.0
NA2	22	23	4.5
NA3	20	19	3.5
NA4	18	18	0.0

Tabla 15. Resultados de cohesión de laboratorio y cohesión calculado con su respectivo error.

Muestra	c (kg/cm^2) (Laboratorio)	c (kg/cm^2) (Calculado)	Error (%)
NO2	0.9	0.82	9.1
NO3	0.25	0.30	20.0
NO4	0.2	0.16	20.8
NA2	0.38	0.40	6.0
NA3	0.28	0.25	10.3
NA4	0.19	0.19	0.96

De acuerdo a los valores obtenidos en las tablas 14 y 15 se obtuvo el promedio de los porcentajes de errores.

- Error de ángulo de fricción: 4.8 %
- Error de cohesión: 11.19 %

Se presenta la comparación de las gráficas entre ϕ_{lab}, ϕ_{cal} y c_{lab}, c_{cal} .

Llumiquinga / Influencia del agua intersticial en los parámetros de resistencia al corte (Triaxial UU), evaluado en dos sitios del Distrito Metropolitano de Quito, aplicado a la estabilidad de taludes en suelos parcialmente saturados en términos de esfuerzos totales.

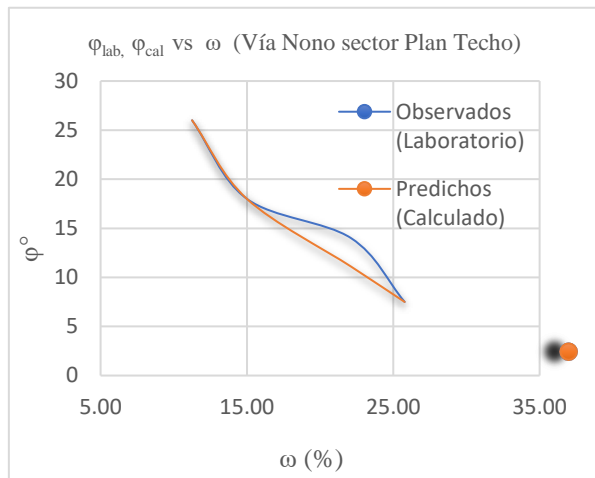


Figura 19. Gráfico ϕ_{lab}, ϕ_{cal} vs ω Vía Nono sector Plan Techo

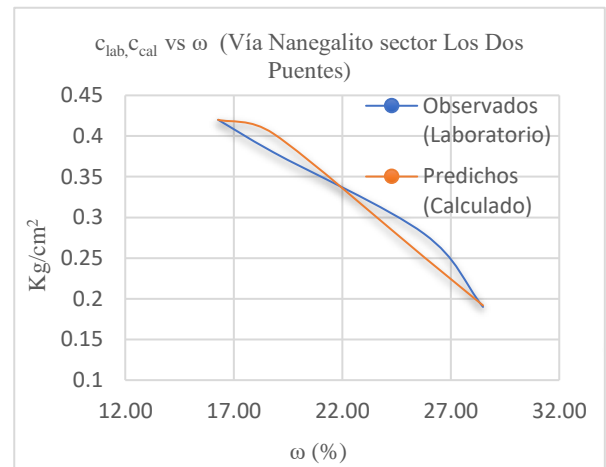


Figura 22. Gráfico c_{lab}, c_{cal} vs ω Vía Nanegalito sector Los Dos Puentes

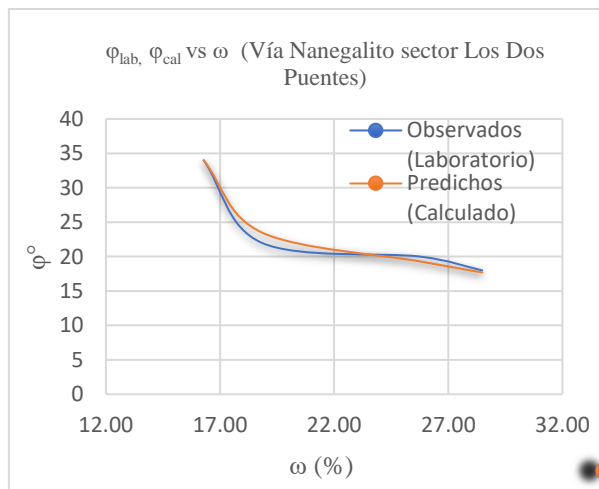


Figura 20. Gráfico ϕ_{lab}, ϕ_{cal} vs ω Vía Nanegalito sector Los Dos Puentes

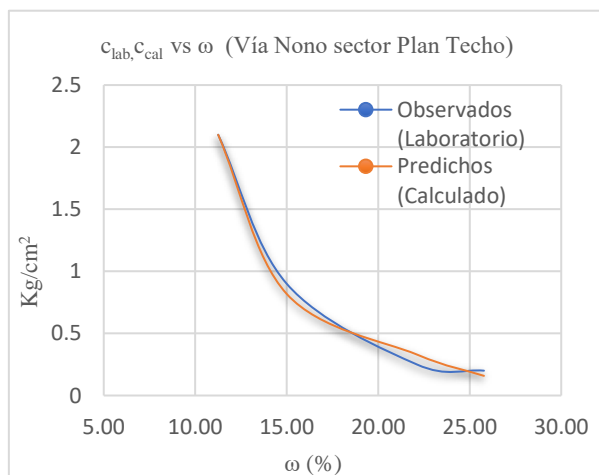


Figura 21. Gráfico c_{lab}, c_{cal} vs ω Vía Nono sector Plan Techo

3.4. Análisis de estabilidad de taludes

Se realizó el análisis de estabilidad de taludes de los sitios antes mencionados. En la tabla 16 y 17 se detallan los resultados de los factores de seguridad que se obtuvieron.

En el anexo 4 se detalla la programación de la hoja de cálculo del factor de seguridad.

Tabla 16. Resumen de resultados del Factor de seguridad Vía Nono con la reducción del ángulo de fricción y cohesión

Vía Nono Sector Plan techo							
ϕ°	c (kg/cm ²)	γ (gr/cm ³)	ω (%)	$\Delta\omega$ (%)	S (%)	FS	RFS (%)
26	2.1	1.724	11.25	0	41	8.31	0
18	0.9	1.782	15.00	3.7	54	3.72	55
14	0.25	1.893	22.11	10.86	80	1.29	84
7.5	0.20	1.950	25.78	14.52	93	0.89	89

En la tabla 16 se detalla que el factor de seguridad en condición de humedad inicial es de 8.31. Con un aumento del porcentaje de humedad de 14.52 %, el FS se reduce a 0.89 por lo que el talud fallaría, esto representa una RFS del 89%.

Tabla 17. Resumen de resultados del Factor de seguridad Vía Nanegalito con la reducción del ángulo de fricción y cohesión.

Vía Nanegalito Sector Dos Puentes							
ϕ°	c (kg/cm ²)	γ (gr/cm ³)	ω (%)	$\Delta\omega$ (%)	S (%)	FS	RFS (%)
34	0.42	1.722	16.28	0	54	1.73	0
22	0.38	1.760	18.83	2.55	63	1.24	28
20	0.28	1.863	25.77	9.49	86	0.99	43
18	0.19	1.903	28.49	12.21	95	0.78	55

En la tabla 17 se detalla que el factor de seguridad en condición de humedad inicial es de 1.73. Con un aumento del porcentaje de humedad de 9.49 %, el FS se reduce a 0.99 por lo que el talud fallaría, esto representa una RFS del 43%.

En base a los resultados que se obtuvieron en las tablas 16 y 17 del análisis de estabilidad de taludes, se puede observar que los taludes fallan cuando a la humedad del suelo le corresponde un grado de saturación cercano al 86%.

4. Conclusiones

Las correlaciones obtenidas en la presente investigación permitieron desarrollar ecuaciones que pueden ser útiles para determinar una reducción de los parámetros de resistencia al corte (Cohesión - Ángulo de fricción) debido al incremento de humedad, la cual afecta a los parámetros resistentes del suelo y por tanto su correspondiente factor de seguridad del talud.

En los modelos de regresión lineal múltiple realizados para la determinación de los valores predichos reducción del ángulo de fricción, el estadístico R-cuadrado ajustado que es más apropiado para comparar modelos con diferente número de variables independientes alcanza un 94.98%, en tanto que para la reducción de cohesión alcanza un R- cuadrado ajustado del 98.12%, por lo cual, de acuerdo a las

correlaciones obtenidas, estas representan un buen ajuste.

Los resultados del análisis de regresión lineal múltiple determinan que los parámetros de resistencia al corte son los más representativos. En el modelo reducción del ángulo de fricción el coeficiente perteneciente a la variable ángulo de fricción es de 1.16 y posee un valor de significancia p-value de 0.0001, en tanto que en el modelo reducción de cohesión el coeficiente de la variable cohesión es de 0.81 y posee un valor de significancia p-value de 0.0002.

Los resultados del análisis de estabilidad de taludes utilizando el método de Bishop simplificado y usando integrales definidas entre el inicio y el final del círculo de falla, indican que para el sitio vía Nono sector Plan Techo con una humedad inicial de 11.25% el FS es de 8.31; con un porcentaje de humedad de 25.78 %, el FS se reduce hasta 0.89 mientras que para el sitio vía Nanegalito sector Los Dos Puentes con una humedad inicial de 16.28% el FS es 1.73; con una humedad de 28.49% el FS se reduce hasta 0.78.

Después de analizar los resultados de los ensayos de laboratorio y realizar el análisis de estabilidad de taludes vía Nono sector Plan Techo y vía Nanegalito sector Los Dos puentes, se pudo evidenciar que, en los dos sitios con un grado de saturación cercano al 86% se produce la falla en los taludes debido a que el FS es igual a 1, encontrándose en equilibrio límite. Se recomienda ampliar la investigación en diferentes taludes para identificar los grados de saturación con el que se produce la falla y establecer una tendencia o correlación.

Mediante el análisis de las gráficas de los parámetros de resistencia calculados y observados que se presentan se pudo evidenciar que, para los dos sitios de estudio, los errores obtenidos para ϕ_{lab} , ϕ_{cal} es de 4.8% en tanto que para c_{lab} , c_{cal} , es de 11.19%, los puntos de acuerdo a las muestras obtenidas en laboratorio y los puntos calculados con diferente porcentaje de humedad no tienen mayor dispersión por lo que se pueden considerar aceptables.

Llumiquinga / Influencia del agua intersticial en los parámetros de resistencia al corte (Triaxial UU), evaluado en dos sitios del Distrito Metropolitano de Quito, aplicado a la estabilidad de taludes en suelos parcialmente saturados en términos de esfuerzos totales.

Se recomienda ampliar la investigación a diferentes sectores de la ciudad, para de esta manera obtener una ecuación con mayor cantidad de datos representativos a fin de obtener una correlación que permita estimar una reducción de los parámetros de resistencia al corte (Cohesión – Ángulo de fricción) para un tamaño muestral más grande.

Se programó un algoritmo en el que se itera la posición inicial y final del círculo de falla, además del ángulo que describe el arco del círculo de falla variando su posición hasta determinar el factor de seguridad mínimo y la posición crítica en donde se ubica la superficie de rotura.

Referencias

- [1] ASTM D2487-17e1, Práctica estándar para la clasificación de suelos con fines de ingeniería (Sistema unificado de clasificación de suelos), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
- [2] ASTM C136, Método de prueba estándar para el análisis por tamizado de agregados finos y gruesos, 2019, www.astm.org.
- [3] ASTM D2216, Métodos de prueba estándar para la determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo, 2019, www.astm.org.
- [4] ASTM D4318, Métodos de prueba estándar para límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de suelos, 2017, www.astm.org.
- [5] ASTM D 854, Métodos de ensayo estándar para determinar la densidad relativa (Gravedad específica) de suelos, 2017, www.astm.org.
- [6] ASTM D2850, Método de prueba estándar para prueba de compresión triaxial no consolidada-no drenada en suelos cohesivos, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015, www.astm.org.
- [7] ASTM D4220 / D4220M-14, Prácticas estándar para conservar y transportar muestras de suelo, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.
- [8] A. Aguilar. “Análisis de Regresión”. Disponible en: <https://www.questionpro.com/blog/es/analisis-de-regresion/>
- [9] B. Das, “Fundamentos de Ingeniería Geotécnica”, 4ta ed. México D.F. Editorial: Cengage Learning Editores, S.A de C.V, 2015, pp.82-87, 334, 225-245, 365-368.
- [10] F. Sanjuán “Economipedia R cuadrado ajustado”. Disponible en: <https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-ajustado-coeficiente-de-determinacion-ajustado.html>
- [11] E. Acuña “Regresión lineal”. Disponible en: <https://academic.uprm.edu/eacuna/miniman9sl.pdf>
- [12] A. M. Lara Porras, “Regresión y Correlación. España: Universidad de Granada, 2017. Disponible en: <http://wpd.ugr.es/~bioestad/guia-r-studio/practica-3/>
- [13] C. Gil. Martínez. “Regresión Lineal Múltiple” 2018. Disponible en: https://rpubs.com/Cristina_Gil/Regression_Lineal_Multiple

- [14] H. Gutiérrez, R Salazar. “Análisis y diseño de experimentos”, 2da ed. McGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A. de C.V. 2008.
- [15] J. Dagnino” ANÁLISIS DE VARIANZA” Rev Chile Anest 2014, pp. 1.
- [16] J. Alcázar “Análisis de Estadística” Disponible en: http://www3.uah.es/juange_alcazar/Estadistica%20Alcala/ANOVA%20multifactorial.pdf.
- [17] J. Amant,” ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias”, 2016. Disponible en: https://rpubs.com/Joaquin_AR/219148.
- [18] Y. Naranjo, K Jaramillo. “Correlaciones múltiples entre propiedades geomecánicas, velocidades de onda de compresión (vp), corte (vs) y datos de clasificación SUCS en el suelo de cimentación del bloque g de la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito - campus Sur., Quito, junio, 2021
- [19] V. Estrada, J. Soberanis, “Estabilidad de Taludes en Suelos” Tesis de Titulación, Universidad Nacional Autónoma de México, Nezahualcóyotl, México, May. 2014