Evaluación de la incertidumbre en el análisis de estabilidad de un talud excavado en suelos residuales



Cesar Hidalgo Facultad de ingenierías-Universidad de Medellín, Medellín, Antioquia, Colombia André Assis Departamento de Engenharia civil- Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

ABSTRACT

In this work was valuated the effect of uncertainty of the parameters of shear strength of soil on stability analysis of a slope of a roadway in Antioquia, Colombia, excavated on residual soils from the geological formation named Stock of Altavista. They were analyzed several sources of uncertainty in geotechnical design and methods for evaluation. It was performed a statistical analysis of direct shear tests conducted on undisturbed samples of residual soils. It was evaluated the stability of a slope of 20 m and average slope of 45 degrees, through the calculation of the probability of failure. Subsequently, an analysis was performed using the vertex method from the fuzzy logic to calculate the safety factor and probability of failure. From the results can be noted that the parameter that has the highest variability and strongly affects the determination of the probability of failure, is the cohesion.

RESUMEN

En este trabajo se avaluó el efecto de la incertidumbre de los parámetros de resistencia al corte de los suelos sobre los análisis de estabilidad de un talud de una carretera en Antioquia, Colombia, excavado en suelos residuales del Stock de Altavista. Se analizaron algunas fuentes de incertidumbre en los diseños geotécnicos y métodos para su evaluación. Se realizó un análisis estadístico de ensayos de corte directo realizados sobre muestras inalteradas de suelo residual. Se evaluó la estabilidad de un talud de 20 m de altura e inclinación promedio de 45 grados, calculando la probabilidad de falla. Posteriormente, se realizó un análisis con lógica difusa usando el método del vértice para calcular el factor de seguridad y la probabilidad de falla. De los resultados se puede destacar que el parámetro que presenta la mayor variabilidad es la cohesión y que afecta fuertemente las determinaciones de la probabilidad de falla.

1 INTRODUCCIÓN

Los procesos y análisis en geotecnia están altamente cargados de incertidumbre y existen muchas fuentes que la generan. En particular el análisis de estabilidad de taludes excavados en suelos tropicales, se encuentra cargado de incertidumbres debido a la variabilidad de estos materiales y a las dificultades para su modelación.

En este trabajo se evalúa el efecto que tiene sobre los análisis de estabilidad, la incertidumbre existente en la determinación de los parámetros geomecanicos tomando como caso de estudio un talud excavado en suelos residuales del stock de Altavista, en Antioquia, Colombia.

2 INCERTIDUMBRE EN GEOTECNIA

En general y como una primera aproximación, las fuentes de incertidumbre en geotecnia se han clasificado en incertidumbre de los datos y de los modelos (Einstein, 2003), (Nadim, 2007) otros autores como Baecher & Christian (2003) clasifican la incertidumbre en la ingeniería geotécnica en tres grandes categorías: variabilidad natural, incertidumbre en el conocimiento e incertidumbre en los modelos de decisión.

La variabilidad natural está asociada con la aleatoriedad inherente a los procesos naturales, manifestándose como variabilidad en el tiempo para

fenómenos que toman lugar en un único lugar (variación temporal), o variabilidad en el espacio para eventos que se producen en diferentes lugares al mismo tiempo (variación espacial), o variaciones tanto en el espacio como en el tiempo. Esta variabilidad natural se aproxima usando modelos matemáticos simplificados o modelos físicos, los cuales solo proporcionan una aproximación al fenómeno natural en el mejor de los casos.

La incertidumbre en el conocimiento es atribuida a la carencia de datos, ausencia de información acerca de eventos y procesos, o a la falta de entendimiento de las leyes físicas que limitan la habilidad para modelar el mundo real. En ocasiones, esta incertidumbre puede ser llamada también epistémica, subjetiva o interna.

En aplicaciones geotécnicas, la incertidumbre en el conocimiento se puede dividir en tres subcategorias: incertidumbre en la caracterización del sitio, incertidumbre en los modelos e incertidumbre en los parámetros.

La incertidumbre en la caracterización del sitio depende de la adecuada interpretación que se hace de la geología subsuperficial. Esto resulta de la incertidumbre de los datos y de la exploración, incluyendo errores de medición; inconsistencia y heterogeneidad de los datos; manipulación de los datos y errores de transcripción; e inadecuada representatividad del muestreo debido a limitaciones de tiempo y espacio. Otro factor que se debe considerar está relacionado con las limitaciones económicas a la hora de realizar la exploración y el muestreo.

La incertidumbre de los modelos depende del nivel de precisión con que el modelo matemático escogido representa la realidad. Esta incertidumbre, refleja la inhabilidad de un modelo o técnica de diseño para representar precisamente el verdadero comportamiento físico del sistema, o la inhabilidad del diseñador para identificar el mejor modelo.

La incertidumbre en los parámetros depende de la precisión con que los parámetros del modelo pueden ser estimados. Resulta de la inexactitud en la determinación de los valores de los parámetros a partir de ensayos o calibración de datos, y es exacerbado por el número limitado de observaciones, resultando en imprecisión estadística.

En cuanto a la obtención de parámetros del suelo se pueden destacar las siguientes fuentes de incertidumbre:

• Error estadístico debido a la cantidad insuficiente de ensavos, de mediciones piezométricas etc.

• Datos tendenciosos (sesgos), que son aspectos del comportamiento real persistentemente alterados por los ensayos, resultados de instrumentación etc.

• Errores de ensayo (ruidos), son aquellos asociados a la precisión de calibración y mediciones, la exactitud de las lecturas etc.

• Variabilidad espacial (natural o inherente) de los parámetros, que es la diferencia real de características del comportamiento debidas a diferencias de composición, meteorización e historia de tensiones entre un punto y otro.

Los dos primeros aspectos analizados contribuyen lo que se denomina "error sistemático", que actúa independiente de la posición o del tamaño del volumen de análisis o superficie de falla, y afecta principalmente la media.

Cuando no se dispone de un número suficiente de ensayos, se puede, con carácter preliminar, utilizar coeficientes de variación estimados (desviación estándar sobre la media), a partir de valores típicos que han mostrado tener poca sensibilidad temporal y espacial. En la Tabla 1 se presentan rangos típicos de coeficientes de variación de los parámetros geotécnicos de interés para análisis de estabilidad de taludes.

La variabilidad de los parámetros geotécnicos que tienen influencia en los procesos de análisis de riesgo por deslizamiento puede ser manejada mediante técnicas estadísticas y probabilísticas. Según el USACE (1999) los valores de los momentos probabilísticos pueden ser estimados de varias formas entre las cuales se pueden citar:

 Análisis estadísticos de determinaciones en ensayos del parámetro deseado

• Ensayos índice que pueden ser correlacionados con el parámetro deseado, y

• Basados en criterio y experiencia cuando no hay datos disponibles.

Estas dos últimas opciones tienen que ser evaluadas con mucho cuidado ya que el nivel de incertidumbre se incrementa gradualmente desde el primero hacia los últimos. En el caso de análisis de confiabilidad, la utilización de correlaciones o datos definidos por la experiencia el problema puede ser enfrentado asumiendo un coeficiente de variación mayor que en el caso de los datos medidos directamente.

Tabla 1. Valores típicos de coeficiente de variación

Parámetro	Coeficiente de variación (%)	Fuente	
Peso específico	3-7	Ribeiro, 2008*	
	4-8	USACE, 1994*	
Peso unitario sumergido	0-10	Duncan, 2000	
Cohesión	20-80		
Ángulo de fricción	2-13	Ribeiro, 2008*	
efectivo	3.7-9.3 arenas y 7.5-10.1 arcillas	USACE, 1994*	
Resistencia no	13-40	Ribeiro, 2008*	
drenada de arcillas	11-45	USACE, 1994*	
Coeficiente de permeabilidad (k)	20-90	USACE, 1994*	
Coeficiente de consolidación (Cv)	33-68	Duncan, 2000	
Presión de preconsolidación (Pp)	10-35	Duncan, 2000	
Indice de compresión (Cc)	10-37	Duncan, 2000	
Número de golpes SPT (N)	15-45	Ribeiro, 2008*	
Resistencia a La compresión uniaxial de metalimolitas	29-55	Hidalgo y Assis, 2003a	
Resistencia a La compresión uniaxial de metacalcáreos	18-40	Hidalgo y Assis, 2003a, Hidalgo et al, 2003b	

*Ambos autores presentan datos de diversas fuentes sin indicar la representatividad de los datos

3 EVALUACIÓN DE INCERTIDUMBRE

Una forma de evaluar la incertidumbre es mediante los análisis por confiabilidad. Ésta se puede entender como la posibilidad que tiene un sistema para realizar las funciones para las que fue concebido. Por otro lado, una falla es todo comportamiento que se pueda considerar anómalo.

Los análisis de confiabilidad, tratan de la relación entre las cargas que un sistema puede sufrir y la capacidad que éste tiene para soportarlas. En geotecnia tanto las cargas como la resistencia son inciertas, por lo tanto el resultado de esta interacción también es incierto. En estadística, se puede definir la confiabilidad como uno menos la probabilidad de falla (Pr)

$$\theta = 1 - P \langle \cdot \rangle$$
 [1]

Donde θ es la confiabilidad y P(r) es la probabilidad de que se produzca la falla.

Actualmente, es común expresar la confiabilidad en la forma de un índice de confiabilidad, que se relaciona con una probabilidad de falla. Se puede entender en este

contexto que la falla incluye no solamente fallas catastróficas sino cualquier diferencia inaceptable entre el comportamiento esperado y el observado.

El índice de confiabilidad, β , del coeficiente o factor de seguridad (FS), es definido por la siguiente expresión Baecher & Christian (2003) y Christian el al (1994), toda vez que el FS crítico es igual a 1,0:

$$\beta = \frac{\mathbf{\mathcal{E}} \left[\mathbf{FS} - 1 \right]}{\sigma \left[\mathbf{FS} \right]}$$
[2]

Donde E[FS] es el valor esperado del factor de seguridad, es decir, el factor de seguridad calculado con los parámetros medios de las variables independientes y σ [FS] es la desviación estándar del factor de seguridad.

El método relaciona el índice β con la probabilidad de ruptura, lo que permite una evaluación más consistente de la estabilidad. Es claro que la Ecuación 2 solo es válida si la distribución de probabilidad del factor de seguridad es normal, lo cual implica que las distribuciones de la resistencia del suelo o de la roca y de las cargas aplicadas también lo sean. Para conocer más detalles de este índice y sobre el uso de otras distribuciones como la lognormal pueden ser consultadas referencias como Nadim (2007), Baecher & Christian (2003) y Wu (2008).

3.1 Métodos probabilísticos

Métodos probabilísticos son aquellos que permiten la evaluación de la distribución de probabilidades de una variable dependiente en función del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables independientes que la generan. Entre los métodos más utilizados en la estadística aplicada a la geotecnia están el Método de Monte Carlo, el método FOSM y el método de estimativas puntuales de Rosenbleuth (Rosemblueth, 1975).

3.1.1 Método de Monte Carlo

El método de Monte Carlo, es una metodología que permite determinar la función de distribución de frecuencia de la variable dependiente analizada mediante la generación de números aleatorios uniformes que representan las variables independientes envueltas. Considera este método que la variable dependiente estudiada presenta una función Y=f(X1, X2...Xn) y que son conocidas las distribuciones de probabilidad de las variables X1, Xn. Son atribuidos valores de frecuencia a valores aleatorios de las variables X1, X2...Xn y se evalúa la función Y para estos valores. El proceso se repite de forma iterativa tantas veces como sea necesario para conseguir la convergencia de la distribución de probabilidad.

La principal aplicación de la técnica de Monte Carlo está en la aproximación de la función de probabilidad para una o más variables aleatorias. La simulación de Monte Carlo requiere una capacidad alta en los cálculos, para la generación de una amplia gama de números.

A partir del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables independientes, valores de estas variables podrían ser obtenidos por medio de un generador de números aleatorios y valores de la variable independiente ser calculados a partir de estos. Se puede decir que cuando este proceso sea repetido N veces, la distribución de probabilidad (forma y magnitud) de la variable dependiente sería obtenida, para $(1-\alpha)$ % de confianza. A partir de esta distribución, sus parámetros estadísticos tales como media, varianza, probabilidades acumuladas etc, podrían ser calculadas.

3.1.2 Método FOSM

El denominado método FOSM (First-Order, Second Moment) utiliza la serie de Taylor para la determinación de la distribución de probabilidad de una función con un número de variables aleatorias (Baecher & Christian, 2003).

Las ventajas de este tipo de solución radican en que los cálculos matemáticos son simplificados y se requiere apenas del conocimiento de los valores de los momentos de las distribuciones estadísticas de las variables que forman la función.

Para N variables aleatorias no correlacionadas, F(x1, x2,, xN), conservando solamente los términos lineales en la Serie de Taylor, produce:

$$E \mathbf{F} = F\left(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N\right)$$

$$V \mathbf{F} = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial F}{\partial x_i}\right)^2 V \mathbf{\Phi}_i$$
[3]
[4]

Donde E[F] y V[F] son la media o valor esperado y la varianza del factor de seguridad, respectivamente; $v[X_i]$

es la varianza de cada variable X_i, y
$$\bar{x}_i = E \mathbf{k}_i$$

La función F es evaluada para los puntos medios de todas las variables, así como la varianza de F. En las expresiones anteriores, la serie de Taylor fue truncada a partir de sus términos de segundo orden, despreciándose portando los efectos de los terceros y cuartos momentos probabilísticos. Sin embargo, esta aproximación es plenamente aceptable para fines prácticos (Baecher & Christian, 2003). Los valores de las derivadas pueden ser obtenidos mediante el cálculo analítico, pero es más usual y recomendable usar la aproximación numérica presentada por Christian et al. (2003).

$$\frac{\partial F}{\partial x_i} = \frac{F(x_i + \Delta x_i) - F(x_i)}{\Delta x_i}$$
[5]

3.1.3 Método de las estimativas puntuales (MEP)

Rosemblueth (1975) propuso un método aproximado que simplifica mucho la tarea de estimar E[F] y V[F] de una, y solamente compromete ligeramente la exactitud cuando las dispersiones de las variables envueltas son muy grandes. Consiste en estimar los momentos (media, desviación estándar, coeficiente de asimetría, etc.) de la variable dependiente en función de las variables

aleatorias independientes, para las cuales se conocen por lo menos dos momentos, media y desviación estándar (o por lo menos sus estimativas), sin la necesidad de conocer las distribuciones de probabilidad completas de las variables independientes o de la dependiente.

Se trata de ponderar la participación de cada variable, calculando dos valores de la función de densidad de probabilidad arbitrariamente escogida para cada variable independiente (Xi), lo que resultará en concentraciones Pi donde se tendrán puntos de estimativa de la variable dependiente (F), que servirán para el cálculo de los momentos de F. Rosemblueth (1975) y Baecher & Christian (2003) presentan en detalle la deducción de las expresiones de este método para una, dos, tres y múltiples variables.

Se toman combinaciones de los valores en las estimativas puntuales máximas (Xi+ σ [Xi]) y mínimas (Xi- σ [Xi]) para cada variable independiente. Por lo tanto, son necesarios 2ⁿ análisis separados. En el caso de análisis de estabilidad de taludes, a cada análisis se realiza una nueva búsqueda de la superficie crítica, la cual puede diferir significativamente de aquella calculada con los valores medios del método FOSM.

Asumiéndose una distribución normal (Gauss) para los valores de F, que podría ser la función del factor de seguridad de un problema dado, calculados con las variables en las estimativas puntuales, el valor esperado E[F] puede ser calculado por el primer momento de la distribución:

$$E \mathbf{F} = \sum_{i=1}^{n} \frac{F_i}{n}$$
[6]

$$\sigma \mathbf{F} = \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{\boldsymbol{\Phi}_{i}}{n} - \sum_{i=1}^{n} \frac{\boldsymbol{\Phi}_{i}}{n} \right)^{\frac{1}{2}}$$
[7]

Combinando los resultados de estos métodos probabilísticos con el índice de confiabilidad de la ecuación 2, resulta fácil determinar la probabilidad de falla (Pr) de un sistema. En cualquier caso Pr es la probabilidad de que el factor de seguridad sea inferior a la unidad.

3.2 Lógica difusa

Juang et al. (1998), presentaron una propuesta en la cual la lógica fuzzy se usó para considerar la incertidumbre en los parámetros a ser usados en análisis de estabilidad de taludes. Los análisis de estabilidad, eran realizados mediante el uso de un programa comercial basado en técnicas de equilibrio límite (PCSTABL) y los parámetros cohesión, ángulo de fricción y el nivel freático eran variados en rangos definidos mediante la aplicación de una técnica de la lógica fuzzy llamada el método del vértice (vertex method).

El método del vértice, se basa en concepto del corte- α o nivel- α (α -curt o α -level) de los números fuzzy e involucra un intervalo de análisis. La idea básica es discretizar un número fuzzy en un grupo de intervalos definidos como se muestra en la Figura 1. Aquí α es cualquier valor en el intervalo [0,1] seleccionado como el grado de soporte o valor de pertenencia $\mu(X)$. Por ejemplo, dibujando una horizontal en $\mu(X)$ =0.5 que intercepta el número fuzzy en dos puntos y un intervalo [X_U,X_L] de la variable o parámetro X es formado con esos dos puntos como se ve en la Figura 1. A este intervalo se le denomina intervalo nivel- α en α =0.5. Repitiendo este proceso para un grupo seleccionado de valores- α , el número fuzzy es discretizado en un grupo de intervalos nivel- α .



Figura 1. Ilustración del método del vértice

El método del vértice es aplicable a diferentes formas del número fuzzy, como la distribución triangular que se muestra en la Figura 1. A continuación se relacionan los pasos seguidos por estos autores en los análisis realizados.

1. Se establece el conjunto fuzzy para cada una de las variables independientes del problema. Para el caso, fueron la cohesión, el ángulo de fricción y la profundidad del nivel freático.

2. Se aplica el método del vértice a cada una de las variables para los niveles α definidos. En este caso se usó 0, 0.5 y 1.0.

3. Se plantean las combinaciones (vértices) posibles de los números encontrados en el paso anterior.

4. Se realizan los cálculos usando el programa de análisis de estabilidad para cada combinación en el nivel- α , manteniendo constantes los parámetros no fuzzy. De los valores de factor de seguridad que se obtienen se seleccionan el máximo y el mínimo, que representan el intervalo- α del número fuzzy del factor de seguridad. Con esto se obtiene el número fuzzy del factor de seguridad, que según los autores representa una "quasi" distribución del factor de seguridad.

5. Interpretación de los resultados: Existen varias posibilidades de análisis para estos resultados

a. Bajo una mirada tradicional, el FS debería ser tomado como el valor más bajo del conjunto fuzzy, lo cual representa el peor escenario y puede ser muy conservativo, principalmente cuando la diferencia entre el máximo y el mínimo FS es amplia.

b. Otra alternativa es tomar la moda del conjunto fuzzy del factor de seguridad, que en general representa el valor del FS que se encontraría con un análisis sin considerar la incertidumbre, pero con la ventaja para el tomador de decisiones que conocería la variación del FS.

c. Otra forma es calcular un factor de seguridad único promediando los factores de seguridad que son menores que la moda y que tienen un grado de confiabilidad de por lo menos 0.5.

En este trabajo se optó por hacer algunas modificaciones adaptando este método para estimar el índice de confiabilidad (Ecuación 2). Con los resultados de factor de seguridad obtenidos para un nivel de α dado, se calculan la media y la desviación estándar muestrales.

4 APLICACIÓN

4.1 Ensayos de laboratorio

Se tomaron diez (10) muestras inalteradas de bloque en suelos residuales del stock de Altavista localizados en el sector occidental del municipio de Medellín en el noroeste de Colombia. Los suelos usados pertenecen al horizonte IB de la clasificación de Deere & Patton (1971)

Se realizaron 30 ensayos de corte directo saturados y 30 no saturados. En el análisis estadístico se determinaron los momentos estadísticos de los diferentes grupos de resultados. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 2

Tabla 2. Resultados de ensayos de laboratorio

Propiedad	Media	Desviació n estándar	Coeficiente de variación (%)
Peso unitario seco (kN/m3)	11,3	1,2	11
Peso unitario húmedo (kN/m3)	15,9	1,4	9
Cohesión no saturada (kPa)	34,7	21,6	62
Cohesión efectiva (kPa)	7,3	7,6	103
Angulo de fricción no saturado (º)	34.6	5,7	16
Angulo de fricción efectivo (º)	37,1	4,8	13

Se puede observar que los valores del ángulo de fricción efectivo difieren del ángulo de fricción en condiciones no saturadas, los cuales en teoría son iguales (Fredlund, 2006). Estas diferencias pueden ser atribuidas a la falta de control de las condiciones de saturación durante el ensayo en condiciones no saturados, que indican altos valores de incertidumbre cuando se usan ensayos de corte directo no saturados, práctica que se ha vuelto común en Colombia.

Se observa que los resultados obtenidos para el coeficiente de variación del ángulo de fricción efectivo y no saturado, peso unitario húmedo, y la cohesión no saturada, son consistentes con los rangos de variación reportados en la literatura y resumidos en la Tabla 1. En cuanto a la cohesión efectiva los resultados se alejan considerablemente de estos rangos.

No existen muchos datos y resultados en la literatura que muestren la variabilidad y la incertidumbre de los parámetros de resistencia al cortante de suelos como los estudiados, sin embargo existen algunos resultados obtenidos para suelos residuales del stock de Altavista que muestran que el orden de magnitud de los parámetros obtenidos es coherente. A partir de ensayos triaxiales CU se han reportado ángulos de fricción variables entre 27° y 37° y de cohesión variable entre 10 y 18 kPa (Gahona, 1990, Álvarez, 1999). Por otro lado, existen resultados de suelos derivados de granito que muestran valores de fricción efectiva entre 27° y 38° y cohesión efectiva entre 12 y 26 kPa (Rahardjo, et al., 2004) y valores de ϕ con media 37.8° y desviación estándar 4.5° (El-Ramly et al. 2005).

Esto resalta que los datos reportados en la literatura pueden servir de guía para evaluar la incertidumbre de algunos de los parámetros enunciados, pero que se hace necesario evaluar experimentalmente la variabilidad de muchos de ellos en el caso de suelos residuales.

4.2 Estabilidad de taludes

Se analizó la estabilidad de un talud de 20 m de altura excavado en suelos residuales del batolito de Altavista. Inicialmente se consideró una inclinación de 45°, considerada en algunos casos como una inclinación segura. Posteriormente se determinó la inclinación óptima considerando criterios probabilísticos y de la lógica difusa. Para los análisis se usó el software Slide 6.0 (Rockscience, 2010) y el método de Bishop simplificado.

En la zona estudiada, los perfiles de suelo se componen de una delgada capa correspondiente al horizonte IA, que en promedio presentan aproximadamente 2 m de espesor, subyacida por el horizonte IB que se extiende hasta profundidades que pueden llegar a los 20 m. Posteriormente se presentan gradualmente los horizontes IIA hasta profundidades de 40 m, a partir de donde se presenta la roca en proceso de meteorización. El modelo usado, compuesto por suelos del horizonte IB, se ilustra en la Figura 2.



Figura 2. Modelo utilizado en el software Slide 6.0.

Los parámetros utilizados fueron la media y la desviación estándar de la cohesión efectiva, del ángulo de fricción efectivo y del peso unitario húmedo (Tabla 2). En este trabajo se evaluó únicamente el efecto de la incertidumbre de los parámetros mecánicos, por lo cual en el modelo (Figura 2) no se consideraron ni el efecto del agua ni el efecto dinámico, tan importante en zonas de amenaza sísmica como el noroeste de Colombia. También se debe advertir que no se han considerado condiciones de saturación parcial.

4.2.1 Método de Montecarlo

Se analizó la estabilidad considerando la herramienta de análisis probabilístico que usa el método de Montecarlo para calcular la probabilidad de falla. Para todos los parámetros se supuso una distribución normal de probabilidades y se obtuvo los resultados de la Tabla 3.

En la Tabla 3, se puede observar que la media del factor de seguridad se estabiliza en un valor de 1.37 a partir de 5000 iteraciones y que esta es mayor que el valor determinístico del factor de seguridad que fue de 1.16. En cuanto a la probabilidad de falla, se adopta el valor de 2.7% obtenido para 10000 iteraciones.

Tabla 3. Sensibilidad del método de Montecarlo con el número de iteraciones para un talud de 20 m de altura y 45º de inclinación.

Numero de iteraciones	Factor de seguridad determinista	Media del factor de seguridad	Probabilidad de falla (%)
500	1.16	1.36	2.4
1000	1.16	1.37	3.3
2000	1.16	1.38	2.4
5000	1.16	1.37	2.3
10000	1.16	1.37	2.7

De acuerdo con criterios acerca de la probabilidad de falla admisible, como los mostrados en la Tabla 4, este talud presentaría un nivel de desempeño pobre o por debajo de lo esperado. Por lo tanto en este tipo de suelos y para estas alturas de corte se deberían usar otras inclinaciones para garantizar un mejor desempeño.

Tabla 4. Índices de confiabilidad objetivo y probabilidades de falla admisibles (USACE, 1999)

Nivel esperado	de o	desempeño	β	P[r]
Alto			5	3x10 ⁻⁷
Bueno			4	3x10 ⁻⁵
Arriba de	el prome	dio	3	10 ⁻³
Abajo de	l prome	dio	2.5	6x10 ⁻³
Pobre			2.0	2.3x10 ⁻²
Insatisfa	ctorio		1.5	7x10 ⁻²
Peligroso	b		1.0	1.6x10 ⁻¹

Se identificó la inclinación máxima para garantizar un comportamiento adecuado para este talud. Se evaluaron ángulos de 40° y 35°. En la Tabla 5 se aprecia que, aunque la media del factor de seguridad es mayor que 1.5, que se considerada adecuado en la mayoría de los códigos, la probabilidad de falla para el talud con 40° indica que su comportamiento estaría por debajo del promedio. Para 35° se obtuvo una media del factor de seguridad de 1.8 y una probabilidad de falla de 5x10⁻⁴, la cual permite esperar un desempeño por encima del promedio.

Tabla 5. Sensibilidad de la probabilidad de falla con diferentes inclinaciones del talud de 20 m de altura.

Inclinación del talud (º)	Factor seguridad determinista	de	Media factor segurida	del de Id	Probabilidad de falla (%)
45	1.16		1.37		2.7
40	1.37		1.61		0.18
35	1.57		1.81		0.05

Cabe resaltar que en este caso solo se están considerando fuentes de incertidumbre relacionadas con la determinación de los parámetros requeridos en los modelos y que las altas incertidumbres asociadas a parámetros como la cohesión lleva a diseños más seguros, pero costosos.

4.2.2 Método FOSM

Se analisó la confiabilidad usando el FOSM, usando el programa Slide 6.0 se calculó el valor esperado o media del factor de seguridad (factor de seguridad con las medias de los parámetros), y con incrementos de 10% en cada variable para calcular la varianza del factor de seguridad. Para efectos de comparación, sólo se analizó el caso del talud inclinado 45°. Los resultados del proceso se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Resultados de la evaluación por el método FOSM para el talud de 45°.

Parámetro	γ'n	C (kPa)	φ (°)
	(kN/m3)		
(X)	15.9	7.3	37.1
Δxi	1.59	0.73	3.71
F(xi+∆xi)	1.16	1.19	1.29
$\Delta \mathbf{f}$	0	0.03	0.1
$\frac{\partial f}{\partial x_i}$	0	0.04	0.03
$\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2$	0	0.0016	0.0009
V(xi)	1.96	57.76	23.04
$\left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 V(x_i)$	0	0.09	0.02

X es el valor medio del parámetro; V(x_i): es la varianza del parámetro ($V = \sigma^2$)

4.2.3 Método MEP

Se realizó un segundo análisis de confiabilidad usando el método de las estimativas puntuales, para esto, usando el programa Slide 6.0 se calculó el factor de seguridad como ilustran las ecuaciones 6 y 7 para calcular la varianza y la media del factor de seguridad. Al igual que en el caso anterior y para efectos de comparación con los métodos anteriores, sólo se analizó el caso del talud inclinado 45°. Los resultados del proceso se presentan en la Tabla 7, en la cual el signo más (+) indica que a la media del parámetro se le sumó la desviación estándar y el signo menos (-) indica que se le restó. El primer signo representa al peso unitario, el segundo la cohesión y el tercero el ángulo de fricción.

Tabla 7. Resultados de la evaluación por el método de estimativas puntuales

Combinación	FSi	(FSi)2
F+++	1.6	2,56
F++-	1.22	1,48
F+	0.64	0,41
F+	0.9	0,81
F-++	1.64	2,69
F	0.63	0,39
F-+-	1.3	1,69
F+-+	0.9	0,81

Con los resultados de la Tabla 7 y las ecuaciones 6 y 7 se obtuvo una media de 1.1, varianza de 0.25 y una desviación estándar de 0.5, del factor de seguridad. Mediante la ecuación 2 se determinó un índice de confiabilidad de 0.2, que corresponde a una probabilidad de falla de 42%.

Como se observa, con este método se obtiene una probabilidad de falla mayor que en el método FOSM, lo cual se debe entre otras cosas a que al introducir los incrementos o decrementos de los parámetros, que este caso son iguales a la desviación estándar, los círculos de falla calculados se desplazan unos en relación a los otros, por lo cual la dispersión de los resultados es mayor.

4.2.4 Lógica difusa

Se realizó un tercer análisis de confiabilidad usando el método presentado en el numeral 3.2 para considerar la incertidumbre. Para esto, usando el programa Slide 6.0 se calculó el factor de seguridad para diferentes combinaciones de c, ϕ y γ _h. Para esto se definieron los números fuzzy para cada variable como se muestra en las Figuras 3, 4 y 5 y se adoptó un nivel α =0.5. El número fuzzy se definió arbitrariamente usando la media de los parámetros de la Tabla 2 y desviaciones estándar tomadas de la literatura (Tabla 1). En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos.



Figura 3. Intervalo con a=0,5 para la cohesión

Con los resultados de la Tabla 8 se calculó una media para el factor de seguridad de 1.19 y una desviación estándar de 0.15. Mediante la ecuación 2 se determinó un índice de confiabilidad de 1.24 que corresponde a una probabilidad de falla de 11%.







Figura 5. Intervalo con a=0,5 para el peso unitario húmedo.

Tabla 8. Resultados de factor de seguridad usando técnicas de lógica difusa para un valor de α =0,5

γ (kN/m³)	φ(°)	c (kPa)	FS
15.5	34.5	5.1	1.00
15.5	34.5	9.5	1.16
15.5	40.1	5.1	1.19
15.5	40.1	9.5	1.35
16.3	34.5	5.1	0.99
16.3	34.5	9.5	1.15
16.3	40.1	5.1	1.27
16.3	40.1	9.5	1.43

Como se observa, el factor de seguridad medio de 1.19, es bastante próximo del valor determinista de 1.16 evaluado antes, pero en su evaluación se ha considerado la incertidumbre de los parámetros. Por otro lado, se obtuvo una probabilidad de falla menor que en los métodos FOSM y MEP, aunque mayor que la determinada por el método de Montecarlo para el mismo talud. Esto indica que usando este método se pueden obtener buenos resultados en análisis de confiabilidad en taludes con un número menor de cálculos que con el método de Montecarlo.

5 CONCLUSIONES

Los resultados de laboratorio muestran que la variabilidad de los suelos residuales derivados del stock de Altavista, evaluados en este trabajo, se encuentra dentro de rangos similares a los de otros suelos reportados en la literatura, excepto los correspondientes a la cohesión efectiva y los del ángulo de fricción de los suelos sin saturar.

Los métodos probabilísticos para el cálculo de la probabilidad de falla como el FOSM y el MEP presentan una tendencia a sobre estimar la probabilidad de falla cuando se comparan con el método de Montecarlo y las estimativas usando las técnicas de la lógica difusa.

Muchos taludes excavados en estos suelos residuales, que han sido diseñados considerando únicamente cálculos deterministas de factores de seguridad, tomando como criterio el factor de seguridad 1.5 pueden tener implícitas probabilidades de falla consideradas inadecuadas con los criterios adoptados en este trabajo.

6 REFERENCIAS

- Álvarez. J.B. 1999. *Caracterización Geotécnica de un Suelo Derivado, de las Rocas Ígneas del Stock Altavista*. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 110 p.
- Baecher, C. & Christian, J.T. 2003. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. England. John Wiley & Sons, pp 17-376.
- Christian, J.T., Ladd, C.C. y Baecher. G.B. 1994. Reliability Applied to Slope Stability Analysis. *J. of Geot. Eng*, vol. 120, no. 12, pp. 2180–2207.
- Deere, D. U., and Patton, F. D. 1971. Slope Stability in Residual Soils. Fourth Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, American Society of Civil Engineers, pp. 87-170.
- Duncan. J. M. 2000. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *J. of Geot. and Geoenv. Eng*, vol. 126, no. 4, pp. 307-316.
- Einstein. H. 2003. Uncertainty in Rock Mechanics and Rock Engineering—Then and Now. En *ISRM 2003— Technology roadmap for rock mechanics.* Pretoria. South African Institute of Mining and Metallurgy, SAIMM Symposium Series S33. pp 281-293.
- El-Ramly, H., Morgenstern, N.R. & Cruden, D.M. 2005. Probabilistic assessment of stability of a cut slope in residual soil. Ge otechnique, vol 55, No. 1, 77–84
- Fredlund, D.G. 2006. Unsaturated soil mechanics in engineering practice. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineerig. No. 3, pp 286 - 321.
- Gaona W.R. 1990. *Perfil Típico de Meteorización del Stock de Altavista*. Trabajo dirigido de grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 134 p

- Hidalgo, C.A., Assis, A. y Pastore, E. 2003a. Caracterización de un macizo rocoso utilizando ensayos de carga puntual y triaxiales. En *Memorias de la XII Conferencia Panamericana de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica*. Culligan, P.J. Einstein, H.H. y A.J. Whittle. Cambridge, Verlag Glückauf Essen, pp. 495-500.
- Hidalgo, C.A. Assis, A & Pastore, E. 2003b. Determinación de la resistencia de la roca intacta en la caracterización de macizos rocosos". *Rev. Ing. Univ. de Medellín*, vol. 1, no. 3, pp. 89–102, ene-jul.
- Juang, C.H., Jhi, Y, Lee, D. 1998. Stability analysis of existing slopes considering uncertainty. *Engineering Geology*, 49:111-122.
- Nadim. F. 2007. Tools and Strategies for Dealing with Uncertainty in Geotechnics. En *Probabilistic Methods in Geotechnical Engineering*. D.V. Griffths y G.A. Fenton. Nueva York, Springer, pp 71-96. 2007.
- Rahardjo, H., Aung, K.K., Leong, E.C. & Rezaur. Characteristics of residual soils in Singapore asformed by weathering. Engineering Geology, 73 (2004) 157– 169.
- Ribeiro, R.C.H. 2008. *Aplicações de probabilidade e estatística em análises geotécnicas*. Tesis de doctorado en ingeniería Civil Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2008, pp 30-112.
- Rocscience Inc. 2010, *Slide Version 6.0 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis.* www.rocscience.com, Toronto, Ontario, Canada
- Rosenblueth. E. Point estimates for probability moments. Proc. Nat. Acad. of Sc, vol. 72, no. 10, pp. 3812–3814. 1975.
- U.S.A.C.E. 1999. Risk-Based Analysis in Geotechnical Engineering for Support of Planning Studies. U. S. Army Corps of Engineers. pp 1-133.
- Wu. T.H. 2008. Reliability analysis of slopes. En Reliability-Based Design in Geotechnical Engineering-Computations and Applications. K. K. Phoon. Londres, Taylor-Francis, pp 385-412.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos al Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico Del Brasil (CNPq) y a la Universidad de Medellín por el apoyo financiero de los estudios doctorales del primer autor, así mismo a la UnB y su Programa de Posgrado en Geotecnia.