



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estudio de la variación de los Parámetros Mecánicos de un Talud de Suelo Residual Tropical a través de la aplicación en Laboratorio de un Nutriente Precipitador de Carbonato de Calcio sobre sus Bacterias Nativas

Study of the variation of the Mechanical Parameters of a Tropical Residual Soil Slope through the Laboratory application of a Calcium Carbon Precipitating Nutrient on its Native Bacteria

José Daniel Muñoz Martínez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Departamento de Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2019

Estudio de la variación de los Parámetros Mecánicos de un Talud de Suelo Residual Tropical a través de la aplicación en Laboratorio de un Nutriente Precipitador de Carbonato de Calcio sobre sus Bacterias Nativas

José Daniel Muñoz Martínez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería – Geotecnia

Directora:

Ph.D., Yamile Valencia González

Codirector:

Ph.D., José Camapum de Carvalho

Línea de Investigación:

Bio Ingeniería

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas

Departamento de Ingeniería Civil

Medellín, Colombia

2019

A mis Padres

Agradecimientos

A Giraldo mi Padre y Elvira mi madre, por todo su amor y apoyo incondicional, por hacer que este proyecto sea una realidad, gracias por siempre creer en mí.

A Marlyn Muñoz, por su motivación, afecto y cariño, gracias por estar siempre a mi lado.

A mi directora, Profesora Yamile Valencia, por su ayuda y guía en la realización de este trabajo, muchas gracias por brindarme sus conocimientos y experiencia.

A mi codirector, Profesor José Camapum de Carvalho, por recibirme en el Brasil y brindarme sus conocimientos y gran experiencia en el tema.

Al laboratorio de mecánica de suelos y pavimentos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, a su director para la época de esta investigación, Profesor Oscar Echeverri, por facilitar los equipos e insumos vitales en el desarrollo de este trabajo, también a los laboratoristas y a los y las monitoras, por su colaboración en los ensayos.

A los profesores del área de Geotecnia, por brindar sus conocimientos y contribuir en mi crecimiento académico y profesional.

Al Profesor Eduardo Montoya del Instituto de Educación Superior de Brasilia por los conocimientos transmitidos en el manejo del software de estabilidad empleado en este trabajo.

Al Laboratorio de Geotecnia de la Universidad de Brasilia, a su directora y laboratoristas y en especial a Andrea Cardona Pérez, por su colaboración en la elaboración de los ensayos realizados.

Al Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá SIATA, por suministrar la información de los eventos de lluvia en la zona de estudio, utilizados en este trabajo.

A mis amigos y compañeros de la maestría en Geotecnia, por su amistad, por todo el tiempo compartido y por contribuir de una u otra manera en el desarrollo de esta tesis.

Resumen

En los últimos años, en el área de la geotecnia se ha venido trabajando en la búsqueda de nuevos métodos alternativos de mejoramiento de suelos, destacándose el avance en técnicas de ingeniería sostenible y menos destructivas ambientalmente, como es el caso de la Bioingeniería y Biotecnología; técnicas que pretenden dar soluciones a los problemas de ingeniería de forma innovadora y amigable con el medio ambiente. Todas estas ventajas llevaron a desarrollar la actual investigación, que trata de aplicar las técnicas de Biotecnología en el mejoramiento de suelos a través de la precipitación de carbonato de calcio inducido microbiológicamente MICCP (Microbially induced calcium carbonate precipitation). Para ello se tomó un suelo residual tropical de la parte norte de la cordillera central de los andes, en la ciudad de Medellín, el cual se caracterizó antes y después de ser aplicado un nutriente precipitador de carbonato de calcio denominado B4, en las bacterias nativas del suelo, para posteriormente comparar los efectos de la adición en la mejoría de las propiedades geotécnicas, y consecuentemente en la estabilidad de un talud. Los resultados obtenidos en este trabajo mostraron, que a pesar de no generarse una precipitación de minerales de carbonato de calcio, se dio un efecto químico que densificó las muestras, repercutiendo en una mejoría en algunas de las propiedades geotécnicas del suelo, en especial aquellas que tienen que ver con la resistencia del mismo, como la cohesión y ángulo de fricción, influenciando por tanto los resultados de estabilidad del talud; mostrándose como una técnica promisoría en el mejoramiento del suelo desde el laboratorio, considerándose que su implementación en campo requeriría de estudios más detallados y en una mayor variedad de suelos.

Palabras clave: Estabilidad de Taludes, Suelo Tropical, Biomineralización, Precipitación de Carbonato de Calcio.

Abstract

In recent years, in the area of geotechnics work has been done in the search for new alternative methods of soil improvement, highlighting the progress in sustainable engineering techniques and less environmentally destructive, as is the case of Bioengineering and Biotechnology; techniques that aim to provide solutions to engineering problems in an innovative and environmentally friendly way. All these advantages underwent a development of current research, which seeks to apply biotechnology techniques in soil improvement through the reduction of microbiologically induced calcium carbon MICCP (precipitation of microbially induced calcium carbonate). This requires a tropical residual soil from the northern part of the central Andes mountain range, in the city of Medellín, which is characterized before and after a calcium carbon precipitator nutrient called B4 is applied, in native bacteria of the soil, to later compare the effects of the addition in the improvement of the geotechnical properties, and consequently in the stability of a slope. The results obtained in this experienced work, which despite not generating a precipitation of calcium carbon minerals, gave a chemical effect that densifies the samples, resulting in an improvement in some of the geotechnical properties of the soil, especially that they have to do with its resistance, such as cohesion and friction angle, thus influencing the stability results of the slope; showing itself as a promising technique in soil improvement from the laboratory, considering its implementation in the required field of more detailed studies and in a greater variety of soils.

Keywords: Slope stability, Soil Tropical, Bioprecipitation, Biomineralization, Calcium Carbonate Precipitation.

Contenido

Resumen	VIII
Abstract	IX
Contenido.....	X
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas.....	XV
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVI
Introducción	1
1. Estado del Arte	5
1.1 Suelo Residual Tropical	5
1.2 Microbiología del Suelo	8
1.3 Biomineralización	9
1.4 Estabilidad de taludes para suelos no saturados.....	11
1.5 Antecedentes	13
2 Área de Trabajo.....	15
3 Metodología.....	17
3.1. Toma de muestras de suelo	17
3.2. Adición del Nutriente.....	18
3.2. Caracterización Física.....	19
3.2.1. Humedad Natural.....	19

3.2.2. Gravedad Específica.....	19
3.2.3. Granulometría.....	20
3.2.4. Límites de Consistencia.....	21
3.2.5. Clasificación MCT.....	21
3.3 Caracterización Química.....	23
3.4. Caracterización Mineralógica y Estructural	25
3.4.1. Difracción de Rayos X (DRX).....	25
3.4.2. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	25
3.5. Caracterización Mecánica	26
3.5.1. Resistencia al Corte Directo CD.....	26
3.5.2. Curva Característica por el método del Papel Filtro.....	27
3.5.3. Permeabilidad.....	28
3.6. Cálculo de estabilidad del Talud	30
4 Presentación y análisis de resultados	35
4.3 Caracterización Física.....	35
4.1.1. Humedad Natural.....	35
4.1.2. Gravedad Específica.....	36
4.1.3. Granulometría.....	37
4.1.4. Límites de Consistencia.....	39
4.1.5 Clasificación MCT.....	41
4.2 Caracterización Química.....	41
4.3 Caracterización Mineralógica	43
4.3.1 Difracción de Rayos X (DRX).....	43
4.3.2 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)	45
4.4 Caracterización Mecánica	46
4.4.2 Curva Característica	46
4.2.3 Permeabilidad.....	48

4.5	Calculo de estabilidad de talud.....	49
4.4.1	Resistencia al Corte Directo CD.....	57
4.4.2	Curva Característica	59
4.2.3	Permeabilidad.....	62
4.5	Calculo de estabilidad de talud.....	63
5	Conclusiones y recomendaciones.....	71
	Bibliografía.....	72

Lista de Figuras

Figura 1.1 Esquema del manto de Meteorización según Strakhov 1967, modificado de (Hoyos Patiño, 2004).	6
Figura 1.2 Distribución global simplificada de los principales suelos residuales tropicales (basada en el mapa de suelos del mundo de la FAO) modificado de (Hoyos Patiño, 2004).	8
Figura 2.1 Localización del Área de Trabajo. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2008)	15
Figura 2.2 Muestra de Suelo del Cerro El Volador	16
Figura 2.3 Talud de estudio	16
Figura 3.1 Método de Picnómetro de fondo Plano	20
Figura 3.2 Picnómetro de Gas	20
Figura 3.3 Granulometría por Tamizado	20
Figura 3.4 Granulometría por Hidrómetro	20
Figura 3.5 determinación del Limite Líquido	21
Figura 3.6 Determinación del límite plástico	21
Figura 3.7 reabsorción de agua	23
Figura 3.8 Penetración con aguja estándar	23
Figura 3.9 medición del pH en KCl y agua	24
Figura 3.10 Equipo de MEB	25
Figura 3.11 Preparación de la muestra	25
Figura 3.12 Pastilla tallada natural	26
Figura 3.13 Pastilla Fallada natural	26
Figura 3.14 Pastilla tallada con nutriente	27
Figura 3.15 Pastilla Fallada con nutriente	27
Figura 3.16 Secado de especímenes	28
Figura 3.17 humedecimiento de especímenes	28
Figura 3.18 papel filtro para succión total	28
Figura 3.19 papel filtro para succión matricial	28
Figura 3.20 Ensayo de carga constante	30
Figura 3.21 Perfil del talud de estudio Cerro El Volador	32
Figura 4.1 Curva Granulométrica ensayo mecánico fracción gruesa	37
Figura 4.2 Curva Granulométrica ensayo por hidrómetro fracción fina	38
Figura 4.3 Curva granulométrica 1 día de curado	39
Figura 4.4 Carta de Plasticidad	40
Figura 4.5 DRX suelo Sin B4	43
Figura 4.6 DRX Suelo con B4	44
Figura 4.7 Imagen en MEB suelo sin B4	45

Figura 4.8 Imagen MEB suelo con B4	45
Figura 4.9 Succión Vs Humedad	47
Figura 4.10 Succión Vs Saturación S_r (%)	47
Figura 4.11 Succión Matricial pF/eo Vs Humedad.....	48
Figura 4.12 función de permeabilidad $K_w(\theta_w)_i$	49
Figura 4.13 Presión de poros Sin B4.....	50
Figura 4.14 Análisis inicial estático en QUAKE/W	50
Figura 4.15 Análisis Equivalente Lineal Dinámico en QUAKE/W.....	51
Figura 4.16 FS Sin B4 Estático	51
Figura 4.17 FS Sin B4 con Sismo	52
Figura 4.18 FS con B4 Estático	52
Figura 4.19 FS Con B4 con Sismo.....	53
Figura 4.20 Diagrama de influencia de los parámetros en $V[Fs]$ suelo Sin B4	54
Figura 4.21 Diagrama de influencia de los parámetros en $V[Fs]$ suelo con B4	56
Figura 4.22 Ensayo de Corte directo CD Sin B4, con % de saturación en cada punto.	57
Figura 4.23 Ensayo de Corte directo CD Con B4, con % de saturación en cada punto.	58
Figura 4.24 Envoltente de falla suelo Sin B4, con % de saturación en cada punto.	58
Figura 4.25 Envoltente de falla suelo Con B4, con % de saturación en cada punto.	59
Figura 4.26 Succión Vs Humedad.....	60
Figura 4.27 Succión Vs Saturación S_r (%)	61
Figura 4.28 Succión Matricial pF/eo Vs Humedad.....	62
Figura 4.29 función de permeabilidad $K_w(\theta_w)_i$	63
Figura 4.30 Presión de poros Sin B4.....	64
Figura 4.31 Análisis inicial estático en QUAKE/W	64
Figura 4.32 Análisis Equivalente Lineal Dinámico en QUAKE/W.....	65
Figura 4.33 FS determinístico Sin B4 Estático.....	66
Figura 4.34 FS determinístico Sin B4 con Sismo.....	66
Figura 4.35 FS determinístico con B4 Estático.....	67
Figura 4.36 FS determinístico Con B4 con Sismo.....	67
Figura 4.37 Diagrama de influencia de los parámetros en $V[Fs]$ suelo Sin B4	69
Figura 4.38 Diagrama de influencia de los parámetros en $V[Fs]$ suelo con B4	70

Lista de Tablas

Tabla 1.1 Fases del suelo residual respecto a factores climáticos (Hoyos Patiño, 2004).....	7
Tabla 3.1 Clasificación MCT Rápida, modificada de (Nogami & Villibor, 1995).....	22
Tabla 3.2 Valores típicos de coeficientes de variación (Montoya & Assis, 2011).....	34
Tabla 4.1 Humedad Natural w (%) en la toma de muestras	35
Tabla 4.2 Gravedad específica de los solidos	36
Tabla 4.3 Características de las Agregaciones.....	38
Tabla 4.4 características de agregaciones 1 día de curado	39
Tabla 4.5 Límites de Consistencia	40
Tabla 4.6 Clasificación MCT.....	41
Tabla 4.7 Caracterización Química	42
Tabla 4.8 Resultados ensayo DRX.....	44
Tabla 4.9 Calculo de la $V[F_s]$ del talud suelo sin B4.....	53
Tabla 4.10 Calculo de Probabilidad de Falla Talud suelo sin B4	54
Tabla 4.11 Calculo de la $V[F_s]$ del talud suelo Con B4.....	55
Tabla 4.12 Calculo de Probabilidad de Falla talud suelo con B4	55
Tabla 4.13 Factores de seguridad y Probabilidad de Falla con y sin B4.....	56
Tabla 4.14 Parámetros mecánicos del suelo	59
Tabla 4.15 Calculo de la $V[F_s]$ del talud suelo sin B4.....	68
Tabla 4.16 Calculo de Probabilidad de Falla Talud suelo sin B4	68
Tabla 4.17 Calculo de la $V[F_s]$ del talud suelo Con B4.....	69
Tabla 4.18 Calculo de Probabilidad de Falla talud suelo con B4	69
Tabla 4.19 Factores de seguridad y Probabilidad de Falla con y sin B4.....	70

Lista de Símbolos y abreviaturas

W%	Porcentaje de Humedad
Sr%	Porcentaje de saturación
SD	Sin defloculante
CD	Con defloculante
OH	Ion Hidróxido
M.O.%	Porcentaje de materia orgánica
pH	Potencial Hidrogeno, grado de acidez o basicidad
FS	Factor de seguridad
A.T.%	Agregados totales
C.A.%	Contenido de agregación
Si	Silicio
Fe	Hierro
Fe ²⁺	Oxido ferroso
P	Fósforo
Ca	Calcio
K	Potasio
Al	Aluminio
Mg	Magnesio

t	Temperatura
σ	Esfuerzo normal
τ	Esfuerzo cortante
φ	Ángulo de fricción interna
γ	Peso específico
δ	Diferencial
Δ	Delta, cambio, diferencia
e_o	Relación de Vacíos inicial
pF	Logaritmo de succión en centímetros de una columna de agua
°	Grados
‘	Minutos
”	Segundos
m	Metros
Km	Kilómetros
Km ²	Kilómetros cuadrados
Cm	Centímetros
Seg	Segundos
°C	Grados Centígrados
kPa	Kilo Pascal
B4	Nutriente precipitador de carbonato de calcio
LL	Limite Líquido
LP	Limite Plástico
IP	Índice de Plasticidad
kw(θ_i)	Coefficiente de permeabilidad calculado para un contenido de agua volumétrico específico θ_i

i	Número de intervalo que aumenta con la disminución del contenido de agua
j	Contador desde i hasta m
k _{sc}	Coefficiente de permeabilidad saturado
T _s	Tensión superficial del agua
ρ _w	Densidad del agua
g	Aceleración de la gravedad
m	Número total de intervalos entre la humedad volumétrica saturada y perdida de humedad volumétrica en la curva característica
N	Número total de intervalos calculado entre la humedad volumétrica saturada y la humedad volumétrica igual a cero
Ψ _j	Succión del suelo
MCT	Miniatura Compactada Tropical
C'	Contracción
FEM	Método de Elementos Finitos
FDM	Método de Diferencias Finitas
BEM	Método de Elemento de Frontera
msnm	Metros sobre el nivel del mar
AMVA	Área Metropolitana del Valle de Aburrá
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
ASTM	American Society for Testing and Materials
CICE	Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva
KCl	Cloruro de Potasio
PZC	Punto de Carga Zero
DRX	Difracción de Rayos X
MEB	Microscopia Electrónica de Barrido

FOSM	First Order - Second Moment
SIATA	Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá
MICCP	Microbially induced calcium carbonate precipitation
CaCO ₃	Carbonato de Calcio
NH ₄ , NH ₃	Amonia
CO ₃	Trióxido de Carbono

Introducción

En la geotecnia actual son pocos los estudios que buscan relacionar las características químicas, mineralógicas y estructurales de los suelos con el comportamiento mecánico, y en menor proporción las investigaciones en el ámbito de la Biotecnología y Bioingeniería que traten a partir de la estimulación microbiológica, mejorar las propiedades geotécnicas de los materiales. Se destacan algunos trabajos en el área como los del grupo BACEST de Colombia, en los años 2003 y 2006 e investigadores a nivel mundial como (Whiffin, 2004), (DeJong et al., 2006), (Van Paassen, 2009) (Gómez, 2013), (Shirakawa, M. A. Kaminishikawahara, Vanderley, Kahn, & Futai, 2011), Valencia, (2009), Arrieta, (2011), entre otros. Si bien, estas técnicas muestran cambios en las propiedades de los materiales estudiados, no existe una aplicación al análisis de la variación en la estabilidad de un talud de suelo residual, sometido a la estimulación por medio de un nutriente sus bacterias nativas, como será abordado en esta investigación.

La técnica consistirá en la toma de muestras en campo y la aplicación en laboratorio de un nutriente que genere, a través de procesos metabólicos de microorganismos nativos del suelo, variar las propiedades geotécnicas del mismo; y analizar dicho efecto en la estabilidad del talud existente en campo.

Si bien la técnica se traduce en una reducción en el impacto ambiental por usar las bacterias nativas del suelo, su implementación debe ser estudiada con mayor profundidad para abarcar todos los impactos ambientales que pueda causar la aplicación de dicho nutriente en campo; a su vez es importante resaltar, que la geotecnia tradicional considera los suelos en un estado saturado lo cual subestima las propiedades del suelo, tornándose relevante analizar la estabilidad desde el punto de vista de los suelos parcialmente saturados, acercándose más a la realidad.

Justificación

El territorio colombiano se encuentra ubicado dentro la zona ecuatorial, que da origen a suelos tropicales, más meteorizados, con posible presencia de minerales de oxi-hidróxidos de hierro y aluminio y arcillominerales. Estos materiales presentan comportamiento geotécnico particular, que los torna más susceptibles a procesos de inestabilidad en sus laderas (Hoyos Patiño, 2004). Para prevenir dichos procesos, existen técnicas que pueden ser en muchos casos costosas y causar grandes afectaciones al ambiente. Por tanto, se plantea la actual investigación, que pretende a partir de la incorporación de un nutriente, inducir a las bacterias nativas del suelo a precipitar carbonato de calcio en laboratorio, esto con la finalidad de analizar la variación de algunas de las propiedades geotécnicas de un suelo residual tropical, y su efecto en la estabilidad de un talud; considerando que, la topografía nacional genera problemas de estabilidad en las laderas. Para lo cual se debería buscar nuevas alternativas de solución, teniendo en cuenta, que los suelos en general se encuentran en estado parcialmente saturado, y no en estado saturado como es analizado en la mayoría de los casos, a través de una técnica que puede causar menor impacto ambiental.

Objetivos

Objetivo General

Estudiar la variación de los parámetros mecánicos del suelo de un talud de suelo residual tropical a través de la aplicación en laboratorio de un nutriente precipitador de carbonato de calcio sobre sus bacterias nativas.

Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto de la aplicación de un nutriente precipitador de carbonato de calcio a escala de laboratorio en las propiedades físicas, químicas, mineralógicas y estructurales de un suelo residual.
- Estudiar el efecto de la aplicación en laboratorio de un nutriente precipitador de carbonato de calcio en los parámetros mecánicos del suelo de un talud de suelo residual tropical.
- Analizar la variación en el factor de seguridad de un talud de suelo residual tratado con y sin nutriente precipitador de carbonato de calcio.

Alcance

La presente investigación tiene por alcance, determinar a nivel de laboratorio, como la aplicación de un nutriente precipitador de carbonato de calcio en las bacterias nativas, influye en algunas propiedades geotécnicas de un suelo residual tropical.

Estructura del documento

El documento de esta tesis se divide en 5 capítulos descritos a continuación:

Capítulo 1: en este capítulo se aborda el estado del arte concerniente al tema de investigación, los conceptos y herramientas fundamentales para el desarrollo de este documento, en él se establecen 4 grandes temas: suelos residuales, microbiología del suelo, biomineralización y estabilidad de taludes.

Capítulo 2: área de trabajo, dentro de este capítulo se especifica el lugar de análisis y toma de muestras de suelo objeto de esta investigación, se establece la geología del lugar, el tipo de minerales presentes y el tipo de suelo resultante de la meteorización de la roca.

Capítulo 3: Metodología: se establece en este capítulo la forma como se va a desarrollar la presente investigación, iniciando por la toma de muestras, la clasificación física, química, mineralógica y mecánica del suelo sin tratamiento y después de ser tratado; así como el procedimiento de aplicación del nutriente.

Capítulo 4: Presentación y análisis de resultados: en este capítulo se presenta el análisis de los resultados de la clasificación física, química, mineralógica y mecánica del suelo sin tratamiento y después de ser tratado, además de su efecto en las variaciones del factor de seguridad del talud analizado.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones: en este capítulo se establecen las conclusiones finales de esta investigación con base en los análisis de resultados del capítulo anterior, además se dan sugerencias para las investigaciones futuras.

Para concluir el cuerpo de este documento de investigación, se presenta la bibliografía citada.

1. Estado del Arte

1.1 Suelo Residual Tropical

Los suelos tropicales residuales son aquellos, en cuya formación han predominado intensos y prolongados procesos de meteorización física, química, lixiviación, arrastre y acumulación de materiales insolubles, y movimiento vertical de partículas finas (Hoyos Patiño, 2004).

Según el comité de suelos tropicales (Committee on Tropical Soils of International Society for Soilds Mechanics and Foundation Engineering – ISSMFE) se define el suelo tropical como aquel que presenta peculiaridades en sus propiedades y comportamiento geotécnico, con relación a los suelos de clima templado; debido a la actuación de procesos geológicos y/o pedológicos típicos de las regiones tropicales. Dentro los suelos tropicales, se destacan dos grandes clases: los suelos lateríticos y los suelos saprolíticos (Camapum de Carvalho, Gitirana Jr, & Leão Carvalho, 2012).

Las lateritas son formadas de procesos pedológicos consecuentes del desarrollo de un pH superficial aproximadamente entre 4.5 y 7.0, permitiendo intensa lixiviación de Sílice en la forma $\text{Si}(\text{OH})_4$ y de las bases en la forma de cationes disueltos, mientras que ocurre la precipitación de Aluminio y Hierro Férrico (un estado de oxidación del hierro en la forma Fe^{3+}) en la forma $\text{M}(\text{OH})_3$; dicho proceso genera el enriquecimiento relativo del aluminio y el hierro en sus horizontes de suelo bajo la forma de óxidos. Adicionalmente, el hierro ferroso (un estado de oxidación del hierro en la forma Fe^{2+}), tanto en la forma Fe^{2+} o $\text{Fe}(\text{OH})_2$, es eliminado para condiciones de pH menores que 5.5; su permanencia, bajo la forma de $\text{Fe}(\text{OH})_2$ precipitado, ocurrirá solo en condiciones ambientales no oxidantes y de pH más elevado (Camapun de Carvalho et al., 2012).

El Saprolito se origina de la meteorización química de las rocas, generalmente cristalinas, friables y de baja resistencia, en el que la estructura y fabrica originales, se conservan debido al remplazo pseudomórfico de los minerales originales, sin alteración y transporte subsecuente (Hoyos, 2004). El suelo saprolíticos es genuinamente un suelo residual, en el que su estructura comprende todas la facciones, tales como foliación,

fracturas, juntas y falla del macizo rocoso que quedan preservadas en el macizo de suelo saprolítico (Camapun de Carvalho et al., 2012).

En resumen para que se den las condiciones de formación de un suelo residual, Hoyos, (2004) describe que: debe haber un clima monzónico o ecuatorial húmedo con precipitaciones entre 2.000-5.000 mm/año, cuencas y mesetas con pendientes moderadas menores al 15° sin incisión o destrucción del Saprolito durante el cuaternario, superficies cratónicas en las márgenes pasivos de las placas tectónicas sobre rocas cristalinas intermedias o máficas o sedimentos arcósicos, influencia por levantamiento, fallamiento y fracturamiento por actividad ígnea intrusiva y extrusiva, y posiblemente por alteración hidrotermal. La Figura 1.1, muestra los estratos productos de la meteorización, asociados con factores ambientales.

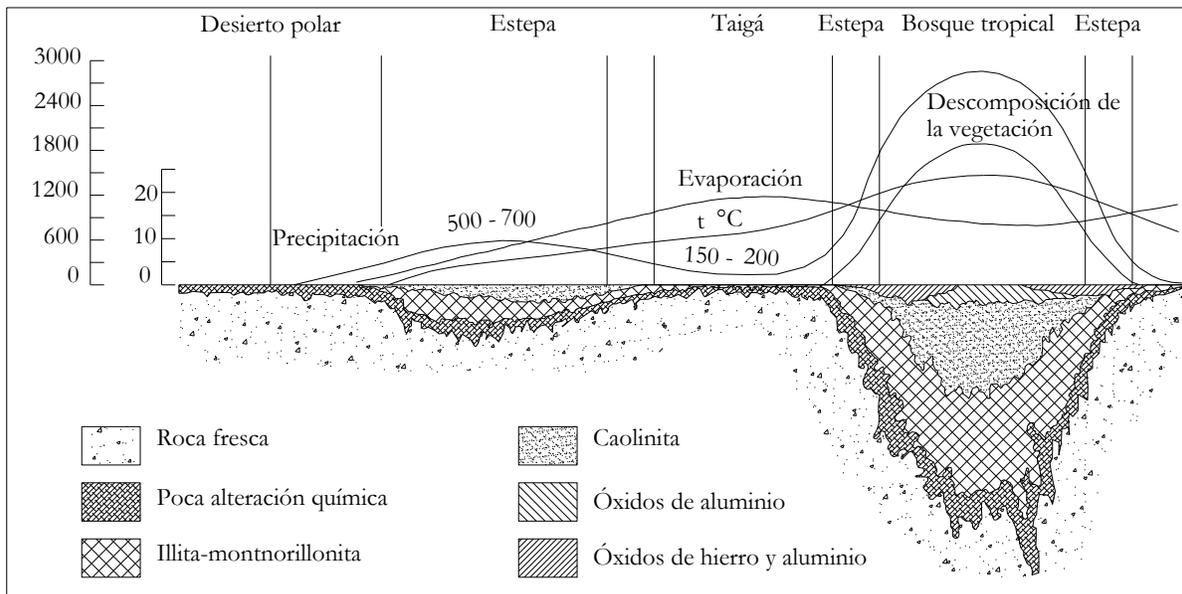


Figura 1.1 Esquema del manto de Meteorización según Strakhov 1967, modificado de (Hoyos, 2004)

Duchaufour (1982), describe tres fases de desarrollo de suelo residual en las zonas tropicales, esas fases están caracterizadas por el aumento de la meteorización de los minerales primarios, la disminución de sílice y el incremento de nuevos minerales formados a partir de los materiales disueltos, estas fases son presentadas en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Fases del suelo residual respecto a factores climáticos (Hoyos, 2004)

Fase	Tipo de Suelo	Zona	T° media	Precipitación anual (m)	Estación seca
1	Fersialítico	Mediterráneo subtropical	13-20	0.5-1.0	Sí
2	Ferruginoso Ferrisoles (transicional)	Subtropical	20-25	1.0-1.5	Ocasional
3	Ferralítico	Tropical	>25	>1.5	No

La Figura 1.2 muestra la distribución global simplificada de los principales suelos residuales tropicales, en los que se observa que, para la región en la que se encuentra la zona de estudio, se presentan tanto suelos fersialíticos como ferralíticos; los primeros son formados por la descalcificación y meteorización de los minerales primarios, durante la estación húmeda, los cuales contienen más óxidos de hierro que los suelos pardos, el hierro libre normalmente es mayor al 60%, y su principal mineral de arcilla de neoformación es la esmética; los suelos fersialíticos conocidos como andosoles son derivados de cenizas volcánicas, muy porosos, de color oscuro y de baja densidad (Hoyos, 2004).

Los suelos ferralíticos son formados en un perfil de meteorización más profundo, donde los minerales primarios excepto el cuarzo se encuentran meteorizados por hidrolisis en condiciones de pH neutro, la sílice remanente se combina con la alúmina para formar caolinita, pero normalmente hay un exceso de alúmina que forma gibsita; el único clima adecuado para su formación es el ambiente húmedo y muy cálido de los bosques pluvial y húmedo tropical (Hoyos, 2004).

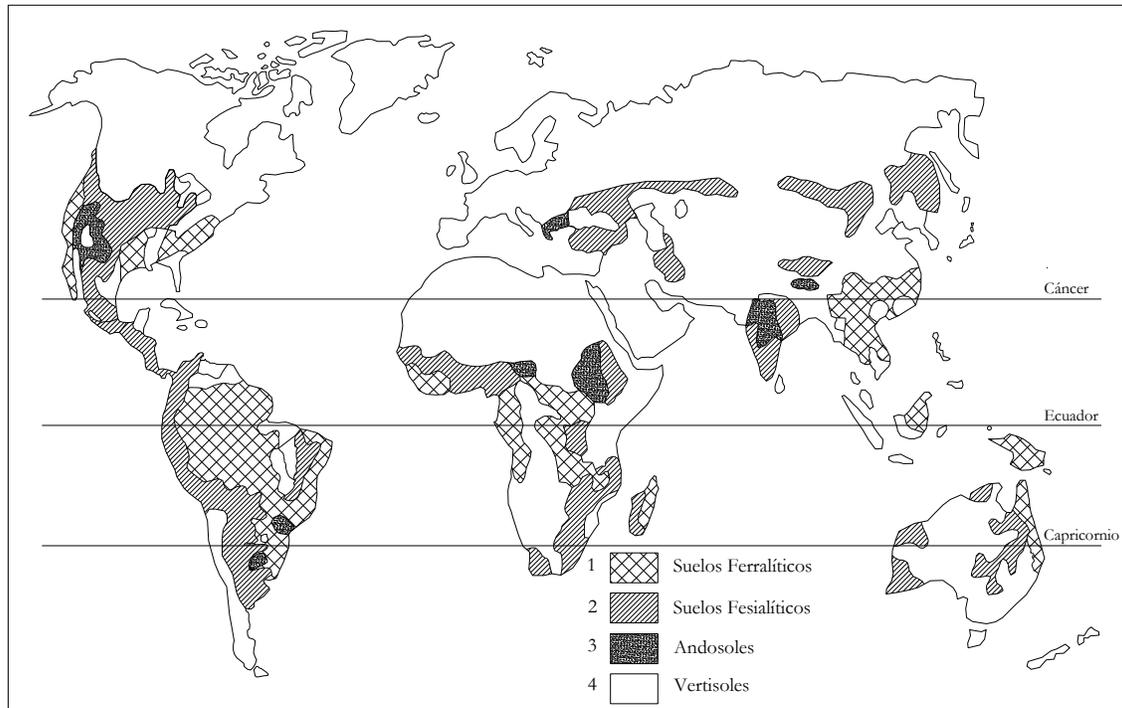


Figura 1.2 Distribución global simplificada de los principales suelos residuales tropicales (basada en el mapa de suelos del mundo de la FAO) modificado de (Hoyos, 2004).

1.2 Microbiología del Suelo

El uso de microorganismos para controlar y gestionar procesos químicos en el subsuelo, es atractivo dada su presencia dominante; se conoce que existen, más de 10^9 microorganismos por gramo de suelo en el metro superior del terreno (Jason T. DeJong, Mortensen, Martinez, & Nelson, 2010). Los cinco grupos principales de microorganismos presentes en el suelo son: las Bacterias, Actinomicetos, Hongos, Algas y Protozoarios, aunque la cantidad de los microorganismos que puede utilizarse para la mediación biológica es numerosa (DeJong et al., 2010); las bacterias sobresalen, de manera especial, pues forman el grupo de microorganismos de mayor diversidad entre las especies, de allí su relevancia en los procesos existentes dentro de los suelos. (Valencia González, 2009).

La población microbiana in situ suele ser estimulada (bioestimulación) a través de la inyección de nutrientes o aumentada (bio-aumento) mediante la inyección de microorganismos adicionales. En cualquier caso, el objetivo es aumentar los niveles de actividad y/o concentraciones de la población microbiana al nivel requerido para

iniciar y sostener una reacción química (DeJong et al., 2010); ya que dichos procesos en la naturaleza pueden demorar cientos de años.

Muchos de los trabajos hechos sobre el tema, tales como los de DeJong *et al.*, (2010), Martínez et al., (2013) y otros, concuerdan que la bacteria que mejor desempeña un papel precipitador es la bacteria *Sporosarcina pasteurii* (*S. pasteurii*), anteriormente llamada *Bacillus pasteurii* y la bacteria *Pseudomonas denitrificans* (Nelson, Lau, Gomez, Anderson, & DeJong, 2014); sin embargo, en estas investigaciones la bacteria es cultivada en cepas en laboratorio, lo cual conlleva a mayores desafíos financieros y a complicaciones ambientales a escala de campo, debido a que, la introducción de estos cultivos no nativos en suelos naturales, puede resultar en consecuencias desconocidas con respecto a la ecología del suelo (Nelson et al., 2014). Por otro lado, estudios han comprobado que estas bacterias se encuentran en gran cantidad en el suelo de forma nativa (Valencia, 2009), por lo que es viable a través de la aplicación de un nutriente precipitador de calcio sobre las bacterias existentes, conseguir la precipitación de minerales de carbonato de calcio en un talud de suelo residual tropical.

1.3 Biomineralización

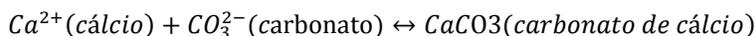
La Biomineralización es un proceso común en la naturaleza, el cual consiste en la precipitación de un mineral proveniente de actividad celular de un ser vivo (Gómez, 2013), mediante el cual los organismos forman precipitados de minerales cristalinos o amorfos; de estos, aproximadamente el 80% son cristalinos, y el 20% son amorfos, constituyendo el calcio, cerca del 50% de todo el biomineral conocido (Soto, 2003). Dicho proceso natural será el resultado de las actividades metabólicas de organismos vivos, en ciertas condiciones ambientales (Valencia, Camapum de Carvalho, & Lara, 2015). Los procesos de biomineralización identificados en la literatura, incluyen la producción de magnetita, greigita (mineral de sulfuro de hierro de la forma Fe_3S_4 , equivalente de azufre de magnetita de óxido de hierro Fe_3O_4), sílice amorfa y calcita.

La carbonatagénesis es un buen ejemplo de biomineralización, en la cual, se produce la precipitación de carbonatos, como la calcita, a través de un proceso en el que la actividad biológica se utiliza para elevar el pH con el fin de crear condiciones sobresaturadas (DeJong et al., 2010).

A su vez la precipitación de carbonato de calcio inducida microbially MICCP se constituye en un proceso de biomineralización, en la cual diferentes especies bacterianas precipitan carbonatos en ambientes alcalinos, ricos en iones Ca^{2+} . La MICP es un prometedor proceso de cementación biomedida que puede mejorar las

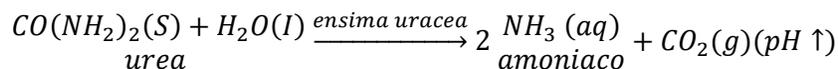
propiedades geotécnicas de suelos granulares mediante la precipitación de carbonato de calcio (calcita) en el suelo (Gomez, Graddy, DeJong, Nelson, & Tsesarsky, 2018).

La precipitación de carbonato de calcio ocurre por la reacción química de equilibrio presentada en la siguiente ecuación, donde la producción de CO_3^{2-} de bicarbonato en agua (HCO_3^{-1}) es altamente dependiente del pH; el crecimiento ocurre bajo condiciones alcalinas (Lee, 2003; Valencia, 2009).

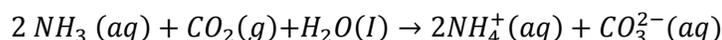


El papel principal de la bacteria en el proceso ha sido asociado a su habilidad de crear un ambiente alcalino (alto pH e incremento de la concentración y disolución de carbono inorgánico) por medio de varias actividades fisiológicas (Hammes & Vestraete, 2002).

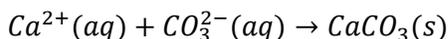
Un ejemplo de precipitación microbiológica es presentada por (Venda Oliveira, da Costa, Costa, & Nobre, 2015), donde la precipitación de carbonato de calcio CaCO_3 inducida microbialmente en suelo, ocurre generalmente añadiendo la bacteria exógena *Sporosarcina Pasteurii* (*S. pasteurii*), para promover la hidrólisis de urea $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$, a través de la enzima ureasa como lo muestra la siguiente ecuación.



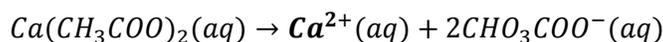
Ahora bien, las moléculas de amoníaco y dióxido de carbono se convierten en ion amonio y trióxido de carbono respectivamente, este último necesario para la formación de carbonato de calcio como se muestra a continuación:



Con una cantidad adecuada de Ca^{2+} , se produce carbonato de calcio Ca^{2+} espontáneamente (Oliveira et al., 2015). La reacción se presenta en la ecuación siguiente:



De acuerdo con Lee (2003), el medio denominado B4 (extracto de levadura 4 g, Glucosa 5 g y 15g de acetato de calcio, $\text{Ca}(\text{CH}_3 \text{COO})_2$ por un litro de solución de agua destilada) optimiza la precipitación de carbonato de calcio CaCO_3 en la bacteria *S. pasteurii*, porque proporciona el Ca^{2+} necesario para la precipitación de carbonato de calcio según la siguiente reacción (Oliveira et al., 2015):



De esta manera se puede crear un sistema Bio-mediador que mejore las propiedades del suelo; sin embargo, las ecuaciones anteriores son referidas a la adición tanto de la bacteria como del nutriente, con las consecuencias ambientales que ello implica. Por otro lado, solo la estimulación de los microorganismos nativos para la biocementación, se convierte en un prometedor proceso en las técnicas de ingeniería de mejoramiento de suelos.

1.4 Estabilidad de taludes para suelos no saturados

La estabilidad de un talud y en especial de aquel conformado por suelos parcialmente saturados, depende en gran medida de la distribución de la presión de poros interna, la cual a su vez, es influenciada por la infiltración del agua de lluvia, originando variaciones de la resistencia del suelo debido a los cambios en el grado de saturación, lo anterior a causa de la desaparición del menisco de agua en los poros, que generan fuerzas de contacto entre partículas, las cuales orinan las fuerzas de succión que le dan resistencia a un suelo parcialmente saturado (Gallegos, Rojas, Leal, & Mora, 2012).

La principal causa de deslizamientos de tierra es el agua, que puede actuar como agente preparatorio y desencadenante de deslizamientos de tierra. Los deslizamientos pueden ocurrir en suelos no saturados o saturados (Camapun de Carvalho et al., 2012). En ambas condiciones, el agua controla el proceso de inestabilidad. La reducción de la succión, la saturación del suelo o el aumento del nivel freática depende de la interacción del suelo con las condiciones climáticas. En condiciones normales, la infiltración de agua lluvia es la principal fuente de agua en las laderas. (Botero, 2018).

Por otro lado, Fredlund & Rahardjo (1993), postularon una ecuación de resistencia al corte del suelo parcialmente saturado que toma la forma de un criterio de falla de Mohr-Coulomb extendido. El término $(u_a - u_w)\tan\phi^b$ se usó para explicar el aumento en la resistencia al corte debido a la succión.

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b$$

Donde,

τ_f : resistencia al corte en suelos no saturados

ϕ^b : ángulo para el aumento de la resistencia al corte con succión matricial

c' y ϕ' : parámetros de tensión efectiva obtenidos de pruebas de suelo saturado

$u_a - u_w$ = succión matricial

$\sigma_n - u_a$ = tensión normal neta en el plano de corte

Se ha demostrado que el aumento de la resistencia al corte debido a la succión se vuelve no lineal cuando el rango de succión es extendido a valores grandes (Escario y Juca 1986; Fredlund et al. 1987; Miao y col. 2002). Por lo tanto, ϕ^b no es una constante, sino que varía en función de la succión del suelo. Las pruebas de laboratorio de suelos no saturados requieren bastante tiempo y requieren equipos de prueba especializados. En consecuencia, la evaluación de la función ϕ^b para su uso ha sido un desafío. La curva característica del suelo, relaciona la succión matricial, $(u_a - u_w)$, con el contenido de agua, o alguna función del contenido de agua como el grado de saturación. Esta relación juega un papel clave en la comprensión del comportamiento del suelo no saturado (Houston, Perez, & Houston, 2008).

En la estabilidad de taludes, una vez que se definen los parámetros de distribución de succión y resistencia, calcular el factor de seguridad es una tarea simple con ayuda de los diferentes métodos tradicionales (Bishop, Morgenster & Price, Spencer, Janbu, Duncan, entre otros). Sin embargo, para tener representatividad de la condición real, es necesario conocer la distribución espacial y temporal de las variables; además, depende fundamentalmente de la interacción del talud con las condiciones climáticas asociadas con la infiltración del agua de lluvia, la variación de la capa freática u otro mecanismo que altere la distribución de la presión de poro en el suelo (Botero, 2018), debido, a como ya se mencionó, el debilitamiento de los parámetros mecánicos del suelo por la presencia de agua y la eliminación de la succión.

Implementar en los modelos de análisis estas variaciones, supone un acercamiento más detallado a la realidad del comportamiento de los taludes, dadas las limitaciones de la mecánica de suelos tradicional respecto a los suelos parcialmente saturados y su interacción con las condiciones climáticas.

Se reconocen dos tipos de métodos de análisis de estabilidad de laderas, los métodos determinísticos y los métodos probabilísticos, los primeros analizan el equilibrio mecánico de un potencial bloque deslizante (equilibrio de fuerzas, fuerza actuante sobre fuerza resistente) y calculan su factor de seguridad, sin embargo adopta valores constantes de las variables envueltas en el modelo, a lo largo del tiempo de análisis; por otro lado los métodos probabilísticos, no tienen significado mecánico, en cambio trabajan con estadísticas multivariadas, permitiendo establecer ciertas relaciones, a partir de numerosos datos y variables, analizando la dependencia entre la ocurrencia de un deslizamiento y los factores que hacen parte del proceso, a través de un monitoreo de la variación de la presión de poros y su efecto en los parámetros mecánicos, a lo largo del tiempo de análisis, creando un índice de evaluación integrado y prediciendo el riesgo (Botero, 2018).

Para modelar el flujo de agua subterránea en medios porosos son utilizados softwares simples de estado estacionario saturado o sofisticados de análisis transitorios saturados/insaturados, con acoplamiento atmosférico en la superficie del suelo, permitiendo estimar la filtración en función del tiempo, donde incluso los problemas de flujo más exigentes, como la infiltración en el suelo seco, se pueden estudiar con facilidad.

El uso de la infiltración en función del tiempo en la estabilidad de taludes, hace posible tratar condiciones complejas de los suelos parcialmente saturados, en donde conociendo la variación de la presión de poros en varios puntos en el tiempo, se hace posible observar los cambios en la estabilidad de un talud con el tiempo.

1.5 Antecedentes

En los últimos años, algunos autores, han estudiado las técnicas de biomineralización y bioprecipitación; en el desarrollo de esta investigación, se siguió la metodología planteada por uno de ellos (Valencia, 2009), quien en su trabajo recolectó muestras de suelo, identificó las bacterias nativas del suelo, utilizó diferentes nutrientes precipitadores de carbonato de calcio y realizó las caracterizaciones geotécnicas de cinco estratos de suelo de la ciudad de Brasilia, Brasil, para ser analizado su comportamiento frente a procesos erosivos; concluyendo que, la técnica mitigó en términos generales dichos procesos.

De igual forma a nivel mundial, la investigación pionera sobre MICCP (Microbially induced calcium carbonate precipitation) en el ámbito geotécnico, se desarrolló principalmente en el año 2004 en Australia en la Universidad Murdoch, y se centró en mejorar la resistencia del suelo mediante biocementación (Whiffin, 2004). Trabajos adicionales fueron desarrollados en los Estados Unidos por la Universidad de California (DeJong, Fritzes, & Nüsslein, 2006) y el Instituto de Tecnología de Georgia (Rebata, 2007), y en los Países Bajos (Van Paassen et al., 2009) en la Universidad Tecnológica de Delft. En Brasil, en el Programa de Posgrado en Geotecnia de la Universidad de Brasilia y en la Universidad de São Paulo, se han realizado algunos estudios sobre el uso de procesos biológicos para mejorar las propiedades de ingeniería del suelo (Gómez, 2013; Valencia et al., 2014; Shirakawa, M. A. Kaminishikawahara, Vanderley, Kahn, & Futai, 2011).

El Grupo BACEST de la Universidad Nacional de Colombia, desarrolló varias investigaciones en bioestabilización, una de ellas realizada por (Martínez, Maya, Rueda, & Sierra, 2003), donde se adicionó la bacteria *Bacillus subtilis* al medio MN y posteriormente se colocó en el suelo, haciendo que éste mejorara sus propiedades físicas -mecánicas; otra investigación realizada por dicho grupo fue la de Gómez (2006), en ella fueron utilizados suelos gruesos adicionados con nutriente B4 más *Bacillus subtilis* y *Bacillus Pausteurii*K, concluyendo que, la utilización de esta técnica es una opción viable para modificar las condiciones hidrodinámicas del suelo.

Arrieta, (2011), encontró en su trabajo que, las bacterias nativas de en un perfil de suelo residual tropical, por medio de la técnica de biomineralización usando nutriente B4, pueden disminuir los procesos erosivos existentes en un talud.

Gómez (2013), analizó como varían las propiedades físicas y mecánicas de un perfil de suelo laterítico con fines de pavimentación, mediante la inducción de la precipitación de carbonato de calcio, usando el medio B4; los

resultados revelaron que con el tratamiento hubo una mejoría considerable únicamente en la resistencia a la tracción del suelo.

Uno de los estudios más recientes, es el de Meza (2019), que buscó ampliar el uso del proceso de Precipitación de Carbonato de Calcio Inducida Microbiológicamente en suelos de diferentes composiciones mineralógicas; esta investigación analizó la influencia de la mineralogía del suelo en la precipitación de carbonato y utilizó como sustratos una arena de cuarzo, un caolín y una bentonita, verificando el uso de la bacteria *Sporosarcina pasteurii* como el mejor microorganismo para inducir la precipitación de carbonatos en los suelos estudiados.

Como puede observarse las investigaciones utilizando la técnica de Biomineralización, a pesar de, haber sido aplicadas para determinar variaciones en las características geotécnicas, ninguna de ellas ha analizado como, dichas variaciones pueden influenciar en la estabilidad de un talud de suelo residual, como se pretende con la presente pesquisa.

2 Área de Trabajo

El área de trabajo se localiza en un talud de suelo residual tropical, que se sitúa sobre la cima del Cerro El Volador, el cual se encuentra ubicado al centro occidente de la ciudad de Medellín, departamento de Antioquia, Colombia; el punto de análisis y toma de muestra se encuentra en las coordenadas $6^{\circ}16'06.9''$ de latitud Norte y $75^{\circ}34'50.6''$ de longitud Oeste, con una altitud aproximada a los 1.586 m.s.n.m. como se muestra en la Figura 2.1. En el lugar se presenta una precipitación media anual de 1127,8 mm/año (AMVA Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2018).



Figura 2.1 Localización del Área de Trabajo. (Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2008)

El Cerro El Volador se ubica en El Valle de Aburrá, en el extremo norte de la Cordillera Central de los Andes Colombianos, el cual ha sido tallado en el "Altiplano Antioqueño" (Henaó & Monsalve, 2018); dicho altiplano es una superficie erosiva de alta elevación, con una extensión de más de 5000 km² y una elevación media de aproximadamente 2500 m sobre el nivel del mar (Restrepo, Foster, Stockli, & Parra-Sánchez, 2009).

El Valle de Aburrá se caracteriza por ser una mezcla de diversos cuerpos geológicos con diferentes litologías, donde uno de esos cuerpos es el denominado Metagabro El Picacho (Henaó & Monsalve, 2018), al norte y noreste de dicho valle, litología de la que se compone El Cerro el Volador, los Metagabros El Picacho, se definen como una nueva unidad en la litoestratigrafía de los alrededores de Medellín (Correa, Martens, Restrepo, Ordóñez, & Martins, 2005), esta unidad corresponde a Metagabros con textura ígnea, gabros miloníticos y anfibolitas de varios tipos, asociados a una secuencia de piso oceánico (ofiolita), dicha secuencia se emplazó sobre el continente y ha sufrido procesos de metamorfismo, formando rocas de color gris moteado de blanco, con variaciones texturales, desde bandeada con alternancia de franjas claras y orientación de los minerales máficos (AMVA, 2018).

La paragénesis mineral está representada por minerales primarios y secundarios, siendo estos últimos los más abundantes. Los minerales primarios son clinopiroxeno, plagioclasa y en menor cantidad cuarzo. Los minerales secundarios son anfíboles, plagioclasa, epidota y ocasionalmente opacos (Correa et al., 2005).

El suelo residual desarrollado por esta unidad de roca es de color variable sobresaliendo el gris claro, ligeramente moteado de blanco, el amarillo y el amarillo rojizo, con una granulometría limo arcillosa (AMVA, 2018), para el caso del lugar de análisis y toma de muestras, se tiene un suelo de color pardo rojizo con algunas incrustaciones de amarillo como se muestra en la Figura 2.2.

La Figura 2.3. muestra el talud objeto de este análisis el cual se encuentra en la cima del cerro el volador en la margen izquierda de la vía circunvalar de la cima del cerro El Volador.



Figura 2.2 Muestra de Suelo del Cerro El Volador



Figura 2.3 Talud de estudio

3 Metodología

3.1. Toma de muestras de suelo

Para la toma de muestras de suelo, se debe tener en cuenta las características del material de acuerdo con los ensayos de clasificación física, química, mineralógica y mecánica que se pretendan realizar. Posteriormente, las muestras serán trabajadas en estado natural y tratadas con la adición de nutriente precipitador de carbonato de calcio, para luego ser ejecutado los ensayos y comparar los resultados.

Del talud de estudio, se tomaron muestras de suelo inalterado de cajón de 0.30 x 0.30 x 0.30 m de dimensión, a una profundidad de un metro aproximadamente desde la superficie del terreno, las cuales fueron talladas y posteriormente cubiertas con papel *vinipel*, para que conserven su humedad, posteriormente fueron trasladadas al Laboratorio de mecánica de suelos y pavimentos de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín; donde se tomó la humedad natural inicial del suelo. Las Figuras 3.1 y 3.2 ilustran la toma de especímenes para la realización de los diferentes ensayos de clasificación física, química, mineralógica y mecánica.



Figura 3.1 Toma de Muestra



Figura 3.2 Muestra de Cajón

3.2. Adición del Nutriente

La metodología empleada en la presente investigación, para la adición del nutriente, fue la propuesta por Valencia (2009), en la cual se coloca un nutriente denominada en la literatura como B4, a las bacterias nativas del suelo, para generar condiciones óptimas y así, precipitar Carbonato de Calcio. Al igual que en la investigación de Valencia (2009), se pretende llenar el 60% de los vacíos del suelo (porcentaje que arrojó buenos resultados en su investigación); para conferir el valor de nutriente a ser adicionado, se determina el volumen exacto de suelo inalterado, su contenido de humedad y su gravedad específica, lo cual permite encontrar el volumen de vacíos sin agua de dicha cantidad de suelo, para agregar 60% de este valor con nutriente.

El nutriente denominado B4, contiene una dosificación de 15 gramos de Acetato de Calcio $\text{Ca}(\text{CH}_3\text{COO})_2$, 4 gramos de extracto de levadura, 5 gramos de glucosa por un litro de agua destilada, verificando que el pH de la solución se mantenga cercano a 8, valor apropiado para la actividad microbiana (Lee, 2003); lo cual se consigue adicionando hidróxido de sodio a 0.1N a la solución (Figuras 3.3).

En la presente investigación se tomaron muestras de suelo inalterado y se les adicionó nutriente a las muestras en laboratorio, realizando perforaciones de aproximadamente de 0.5 cm de diámetro y 1 cm de longitud, para facilitar la incorporación del nutriente en el suelo que será tratado (Figura 3.4 y 3.5). Dicho bloque, se almacenó en un recipiente el cual se aisló con papel *vinipel*, para conservar su humedad, y se dejó actuar el nutriente durante 15 días, tiempo en el cual las bacterias según la literatura generan una óptima precipitación de carbonatos de calcio (Lee, 2003); pasados los 15 días se inicia con la etapa de ensayos de caracterización geotécnica del suelo (Figura 3.6), las mismas que se realizan al suelo sin la adición del nutriente.



Figura 3.3 Preparación B4



Figura 3.4 Preparación de suelo para aplicar B4



Figura 3.5 Aplicación B4



Figura 3.6 Suelo Con B4 pasado 15 días

3.2. Caracterización Física

Para caracterizar físicamente las muestras de suelo con y sin tratamiento se realizaron una secuencia de ensayos que serán descritos a continuación, garantizando una repetitividad de los mismos, mediante la realización de como mínimo tres ensayos.

3.2.1. Humedad Natural

Para determinar la humedad natural de las muestras de suelo, se utilizó el método descrito en la norma (ASTM D2216-10, 2010), con un tiempo de secado de 24 horas. Procedimiento que se repite cada que se extraigan muestras de la zona de estudio y cada que se inicia un ensayo.

3.2.2. Gravedad Especifica

Para la determinación de la gravedad especifica se utilizaron dos métodos, el método del Picnómetro de fondo plano, disponible en el Laboratorio de mecánica de suelos y pavimentos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, con base en el procedimiento descrito en la norma (ASTM D854, 2014) y el método de Picnómetro de Gas (Penta picnómetro), equipo disponible en el Laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Tecnología de la Universidad de Brasilia, estipulado en la norma (ASTM D555, 2014). Las Figuras 3.7 y 3.8 ilustran los dos procedimientos.



Figura 3.1 Método de Picnómetro de fondo Plano



Figura 3.2 Picnómetro de Gas

3.2.3. Granulometría

Para determinar el tamaño de grano de las partículas del suelo, se realizaron ensayos de granulometría por tamizado, según la norma (ASTM D6913/D6913M, 2017), para fracción de partículas con tamaños mayores a 2.0 mm, y el ensayo de granulometría por hidrómetro de acuerdo con la norma (ASTM D7928, 2017) para los tamaños de partículas menores a 2.0 mm; para obtener el porcentaje de dispersión de un suelo, el ensayo de granulometría por hidrómetro se ejecutó usando como guía la norma (ASTM D4221, 2018) en ambas muestras, con y sin defloculante (hexametáfosfato de sodio). Las Figuras 3.9 y 3.10 muestra el montaje del ensayo.



Figura 3.3 Granulometría por Tamizado



Figura 3.4 Granulometría por Hidrómetro

3.2.4. Límites de Consistencia

De acuerdo con la norma (ASTM D4318, 2017), se encuentran el Límite Líquido, Límite Plástico y el Índice de Plasticidad, valores que, junto a los resultados del ensayo de granulometría, serán útiles para la clasificación del suelo, de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) norma (ASTM D2487, 2017). Las Figuras 3.11 y 3.12 muestra el ensayo para el límite líquido y limite plástico.



Figura 3.5 determinación del Límite Líquido



Figura 3.6 Determinación del límite plástico

3.2.5. Clasificación MCT

El ensayo Miniatura Compactada Tropical (MCT) expedita, es un ensayo de clasificación de suelos tropicales propuesto y desarrollado en Brasil por Job Shuji Nogami y D. F. Villibor en 1994, que permite identificar los grupos de suelos tropicales, a través de un gráfico del valor de la contracción diametral *versus* la penetración. Por lo tanto, el método se basa en determinaciones hechas en pastillas que se moldean en anillos de acero inoxidable, que se secan al aire, verificando la contracción diametral, para posteriormente someterlas a reabsorción de agua por un periodo de tiempo de 2 horas, y luego medir la resistencia a la penetración de una aguja estándar con 10 g de masa y 1,3 mm de diámetro, en las pastillas de suelo.

Según (Nogami & Villibor, 1995), la determinación del grupo MCT, se da mediante el parámetro c' de la contracción y los milímetros de penetración de la aguja estándar. La Tabla 3.1 especifica los grupos MCT y las Fotografías 3.13 y 3.14 muestran el procedimiento.

Tabla 3.1 Clasificación MCT Rápida, modificada de (Nogami & Villibor, 1995)

Determinación del Grupo MCT		
C'	Penetración (mm)	Grupo MCT
<0.5	<3.0	LA
	3.1 a 3.9	NA
	≥ 4.0	NA/NS'
0.6 a 0.9	< 2.0	LA - LA'
	2.1 a 3.9	NA' - NA
	≥ 4.0	NS' - NA'
1.0 a 1.3	< 2.0	LA'
	2.1 a 3.9	NA'
	≥ 4.0	NS'
1.4 a 1.7	< 2.0	LA' - LG'
	2.1 a 3.9	NA' / NG' - NS'
	≥ 4.0	NS' - NG'
≥ 1.8	< 2.0	LG'
	2.1 a 3.9	NA'
	≥ 4.0	NG'

(-) Significa equivalente
(/) Significa que tiene mayor peso la primera clasificación

Si la contracción (ct) está entre 0.1 y 0.5 mm, $c' = (\log_{10} ct + 1) / 0.904$

Si la contracción (ct) es > 0.6, $c' = (\log_{10} ct + 0.7) / 0.5$

Donde:

LG' = Arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas.

LA' = Arenas arcillosas lateríticas.

LA = Arena con poca arcilla laterítica.

NG' = Arcillas, arcillas limosas y arcillas arenosas no lateríticas.

NS' = Limos caoliníticos y mica ceos, limos arenosos y limos arcillosos no lateríticos.

NA' = Arenas limosas y arenas arcillosas no lateríticas.

NA = Arenas limosas con limos cuarzosos y limos arcillosos no lateríticos



Figura 3.7 reabsorción de agua



Figura 3.8 Penetración con aguja estándar

3.3 Caracterización Química

Para la caracterización química se realizaron ensayos de determinación de la cantidad presente en el suelo de iones de calcio (Ca), aluminio (Al), magnesio (Mg), fósforo (P) y potasio (K), así como el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), este ensayo fue realizado por el laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. También se realizó el ensayo de Potencial Hidrógeno (pH).

Se determinó adicionalmente, el delta de pH (ΔpH) que permite, estimar el nivel de meteorización del suelo, este valor se calcula como la diferencia del valor obtenido del potencial de hidrógeno del suelo disuelto en agua ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) y del valor del potencial de hidrógeno del suelo disuelto en cloruro de potasio KCl a 1N (pH_{KCl}) (norma ASTM D4972, 2018), Figura 3.15.

Después de obtenidos los datos del pH en agua y en KCl, se procede a él cálculo del ΔpH cuya diferencia es un indicativo del predominio, de Óxidos e Hidróxidos de hierro y aluminio o de arcillominerales, así:

$$\Delta\text{pH} = \text{pH}_{\text{KCl}} - \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$$

$\Delta\text{pH} > 0$ Indica la predominancia de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio en el suelo

$\Delta\text{pH} < 0$ Indica la predominancia de minerales de arcilla en el suelo

Además, se calculó el punto de carga cero (PZC), que representa el valor de pH, donde la carga eléctrica neta del conjunto de partículas es cero, es decir, la carga total positiva es igual a la carga total negativa (Camapum de

Carvalho et al., 2015), lo anterior debido a que si el pH de un suelo está por encima de su PZC, la superficie del suelo tendrá una carga negativa neta y exhibirá predominantemente la capacidad de intercambiar cationes (intercambio de un ion positivo por otro), mientras que si su pH está por debajo de su PZC el suelo retendrá principalmente aniones (electrostáticamente), (intercambio de un ion negativo por otro) (Appel, Ma, Rhue, & Kennelley, 2003), lo que quiere decir que, en general, las partículas tienden a flocular en un medio más ácido o cercano a PCZ y a dispersarse en un medio más alcalino que PCZ (Camapum de Carvalho et al., 2015).

La estimación del punto de carga cero se puede hacer usando la fórmula de Keng y Uehara (1974), citado por (Camapum de Carvalho et al., 2015)

$$PCZ = 2 \text{pH}_{KCl} - \text{pH}_{H_2O}$$



Figura 3.9 medición del pH en KCl y agua

3.4. Caracterización Mineralógica y Estructural

La caracterización mineralógica de las muestras con y sin adición de nutriente se realizaron por medio del ensayo de difracción de rayos X; y para determinar la estructura de dichos materiales se usó la Microscopía Electrónica de Barrido. (MEB).

3.4.1. Difracción de Rayos X (DRX)

Este ensayo se llevó cabo por parte del Laboratorio de Tecnología y Diseño de Materiales de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, con la ayuda de un equipo difractor de rayos x, DRX Rigaku-miniflex con monocromador de grafito, con velocidad de barrido 2 Theta de 60° en modo continuo ($0,5^\circ$ min), el ensayo se realizó en muestras de suelo llevadas a un tamaño de partículas menor a $74 \mu\text{m}$, secas al aire, donde a partir de difractogramas, se pueden definir los minerales presentes en el suelo. Cabe aclarar que el límite de detección del método de difracción de rayos X es del 5%, por consiguiente, muestras que presenten constituyentes por debajo de este límite posiblemente no serán detectadas.

3.4.2. Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

El ensayo de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), se realizó con la ayuda del Laboratorio de Tecnología y Diseño de Materiales de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, el cual uso un Microscopio Electrónico de Barrido con analizador de energía dispersiva de rayos X sobre muestras inalteradas tanto del suelo tratado como sin tratar, las Figuras 3.16 y 3.17 ilustran el equipo utilizado. El método de MEB permite una mayor aproximación y una mejor observación y análisis de la estructura de la muestra a través de imágenes tridimensionales.



Figura 3.10 Equipo de MEB

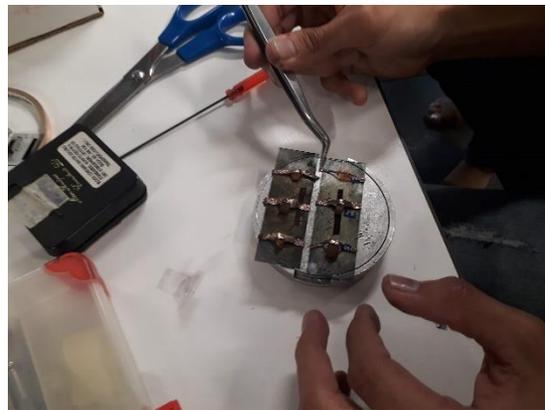


Figura 3.11 Preparación de la muestra

3.5. Caracterización Mecánica

Para caracterizar mecánica las muestras de suelo con y sin tratamiento se realizaron una secuencia de ensayos que serán descritos a continuación, garantizando una repetitividad de los mismos, mediante la realización de como mínimo tres ensayos.

3.5.1. Resistencia al Corte Directo CD

Se ejecutaron ensayos de corte directo consolidado drenado, para muestras de suelo inalterado, con y sin nutriente precipitador de carbonato de calcio, para evaluar el efecto de la adición del nutriente en los parámetros mecánicos del suelo, el ensayo se realizó según lo descrito en la norma técnica (ASTM D3080/D3080M, 2011).

El ensayo se realizó en el equipo de corte del Laboratorio de mecánica de suelos y rocas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, para tres cargas axiales, 60, 120 y 200 kPa; saturando las muestras, en agua durante 24 horas. Para garantizar la disipación de las presiones de poros se adoptó una velocidad de corte de 0.01 mm/min, la cual fue calculada con la consolidación de las muestras durante 24 horas.

A partir de los datos obtenidos de la resistencia al corte para cada carga de confinamiento, se construyen las envolventes de ruptura de las cuales se obtienen los parámetros mecánicos del suelo, Figuras 3.18 - 3.21.

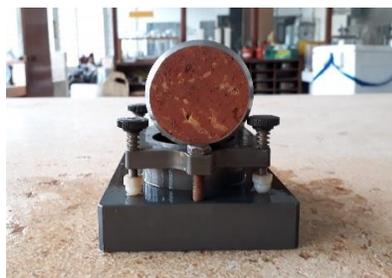


Figura 3.12 Pastilla tallada natural



Figura 3.13 Pastilla Fallada natural



Figura 3.14 Pastilla tallada con nutriente



Figura 3.15 Pastilla Fallada con nutriente

3.5.2. Curva Característica por el método del Papel Filtro

La variable de estado de mayor relevancia para la mecánica de suelos parcialmente saturados, es la succión del suelo. La succión total de un suelo presenta dos componentes, la succión matricial y la succión osmótica. La succión matricial está relacionada con la matriz del suelo, con el tipo de partícula y el arreglo estructural. La succión osmótica está relacionada con la cantidad de sales presentes en el agua existente en los vacíos del suelo (Meza, 2012)

Las variables de la succión del suelo y las mediciones del contenido de agua se combinan para formar la curva característica de retención de agua del suelo, una función que se utiliza para la evaluación de las propiedades del suelo no saturado (Fredlund, Rahardjo, & Fredlund, 2012).

Para esta investigación se encontraron los componentes de la succión del suelo por medio del método de papel filtro, este método consiste en medir la humedad del suelo por medio del potencial de agua retenido en un medio poroso (papel filtro) previamente calibrado, donde la humedad del cuerpo de suelo entra en equilibrio con el papel filtro, obteniéndose la succión total y matricial, el ensayo se realizó con base a la norma (ASTM D5298, 2016).

Las Figuras 3.22 a 3.25 muestran el proceso de ejecución del ensayo de succión por medio del método de papel filtro siguiendo una trayectoria mixta, lo que implica que, una parte de las pastillas empleadas para el ensayo se dejaron secar y otras se humedecen, partiendo de la humedad inicial del suelo que fue de 36%; se dejaron secar las pastillas con humedad menor a 36% hasta llegar a 6% de humedad higroscópica y las pastillas con humedades superiores a la de campo, se humedecieron hasta llegar a una saturación del 100 % correspondiente a humedad de 53%.

La succión del suelo es calculada basados en la humedad del papel filtro al final del ensayo mediante la siguiente ecuación:

Para humedades $> 47\%$, Succión [kPa] $=10^{(6.05-2.48*\text{Log } w\%)}$

Para humedades $\leq 47\%$, Succión [kPa] $=10^{(4.48-0.0622*\text{Log } w\%)}$



Figura 3.16 Secado de especímenes



Figura 3.17 humedecimiento de especímenes



Figura 3.18 papel filtro para succión total



Figura 3.19 papel filtro para succión matricial

3.5.3. Permeabilidad

Se realizó el ensayo de permeabilidad de cabeza constante para flujo laminar de agua a través de suelos, con apoyo de la norma (ASTM D2434, 2006) Figura 3.26, determinando la permeabilidad saturada del material. Esta permeabilidad, permitirá efectuar una correlación junto con la curva característica, para obtener la función de permeabilidad no-saturada del suelo (Fredlund *et al.*, 2012), permeabilidad que será insumo valioso a la hora de evaluar el comportamiento del suelo durante un evento de lluvia y por ende en el análisis de estabilidad del módulo de infiltración del software de estabilidad (GeoStudio versión 2012).

La función de permeabilidad no-saturada (K_w) se puede calcular directamente con ayuda de la curva característica, si se mide el coeficiente de permeabilidad saturado (K_s), como se describe en (Fredlund *et al.*, 2012):

$$k_w(\theta)_i = \frac{k_s}{k_{sc}} A_d \sum_{j=i}^m [(2j + 1 - 2i)(u_a - u_w)_j]^{-2}$$

$$A_d (m \cdot s^{-1} KPa^2) = \text{factor de ajuste [i.e., } (T_s^2 \rho_w g / 2v_w)(\theta_s^p / N^2)]$$

donde:

$k_w(\theta)_i$ = coeficiente de permeabilidad calculado para un contenido de agua volumétrico específico θ_i

i = número de intervalo que aumenta con la disminución del contenido de agua (por ejemplo, $i=1$ identifica el primer intervalo que corresponde estrechamente al contenido de agua saturada θ_s y $i=m$ identifica el último intervalo correspondiente al contenido de agua más bajo θ_L en curva característica experimental)

j = contador desde i hasta m

k_{sc} = coeficiente de permeabilidad saturado

T_s = tensión superficial del agua

ρ_w = densidad del agua

g = aceleración de la gravedad

m = número total de intervalos entre el contenido volumétrico de agua saturado θ_s y el más bajo contenido de agua θ_L en la curva característica experimental

N = número total de intervalos calculados el contenido volumétrico de agua saturado θ_s y el contenido de agua cero (i.e., $\theta=0$) (note que $N=m [\theta_s / (\theta_s - \theta_L)]$, $m \leq N$, and $m = N$ cuando $\theta_L=0$)

Ψ_j = succión del suelo (kPa) correspondiente al punto medio del j^o intervalo



Figura 3.20 Ensayo de carga constante

3.6. Cálculo de estabilidad del Talud

En el desarrollo de esta investigación se tomó como área de trabajo un talud de suelo residual tropical (tratado y no tratado) de la cima del cerro El Volador como se mencionó anteriormente; se efectuó un levantamiento topográfico del terreno con ayuda de nivel de precisión, mira estadimétrica y cinta métrica, lo cual permitió obtener un perfil para ser modelado en el software de estabilidad GeoStudio versión 2012 (caso no saturado), tal como lo muestra la Figura 3.27.

De las caracterizaciones anteriores, se tomaron los resultados para modelar el material con sus propiedades mecánicas e hidráulicas (el peso específico, la cohesión, la fricción, la permeabilidad no saturada y la curva característica de retención de agua), y se utilizaron los módulos del software GeoStudio, SEEP/W, para modelar el cambio en la presión de poros en diferentes momentos a lo largo del tiempo del análisis; cabe resaltar que en la ingeniería geotécnica convencional no es común el uso de la permeabilidad no-saturada, la curva característica de retención de agua y un evento de lluvia acumulada, como será abordado dentro de ésta investigación, sino que, en la mayoría de los casos, se trabaja con la condición más crítica que es únicamente considerando la cohesión y la fricción en estado saturado.

Con el módulo SLOPE/W se calculan los factores de seguridad (estado limite) considerando que se presenta una falla circular, el método utilizado fue el de Morgenstern–Price y se consideró que la resistencia al corte a lo largo de la superficie de falla está gobernada por el criterio de ruptura de Mohr Coulomb; lo anterior se realizó

también, implementando en el modelo el efecto sísmico con ayuda del módulo QUAKE/W y el espectro de diseño para el lugar de estudio, con base en la Descripción de zonas homogéneas de la Microzonificación sísmica del área urbana de Medellín (2011).

El software GeoStudio combina los resultados del módulo SEEP/W, el cual crea un nivel freático colgado bajo infiltración neta a largo plazo de precipitación, para ser usados en el cálculo de estabilidad del módulo SLOPE/W, después de aplicarse en el módulo QUAKE/W el espectro de diseño; los datos de la precipitación que requiere el programa, fueron tomados y procesados de los registros históricos de la red hidrometeorológica del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá SIATA, datos de la estación ubicada en la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, en la base del cerro El Volador, el registro de estación suministra información sobre el año, mes, día, hora, minuto y calidad del dato, de los cuales fueron procesados datos de un evento de lluvia y tres meses de lluvia antecedente a esta; para formar una función de lluvia antecedente, que modificará las condiciones de la presión de poros, a su vez la succión y por consiguiente la resistencia del suelo, a lo largo del tiempo. Los valores del espectro de diseño que se incluirán en los análisis estáticos y pseudoestáticos, son tomados de Microzonificación sísmica del área urbana de Medellín, para la denominada zona homogénea 2, la cual incluye los sectores de: San Javier con los barrios El Morro, La Quiebra, Juan XXIII, Metropolitano, Santa Rosa de Lima, Blanquizal, El Coco, El Pesebre, El Paraíso, Calasanz parte alta, y parte de los barrios Ferrini, Alcázares, La Pradera y Antonio Nariño, la parte sur del sector de Robledo con el barrio San Germán y el cerro El Volador. Los terrenos de esta zona están constituidos por rocas metamórficas correspondientes al Neis de La Iguañá que afloran de manera continua hacia los sectores norte y centro occidental de la zona. También hacen parte de esta zona homogénea los suelos de anfibolita presentes en los cerros El Volador y Nutibara (Alcaldía de Medellín, 2011).

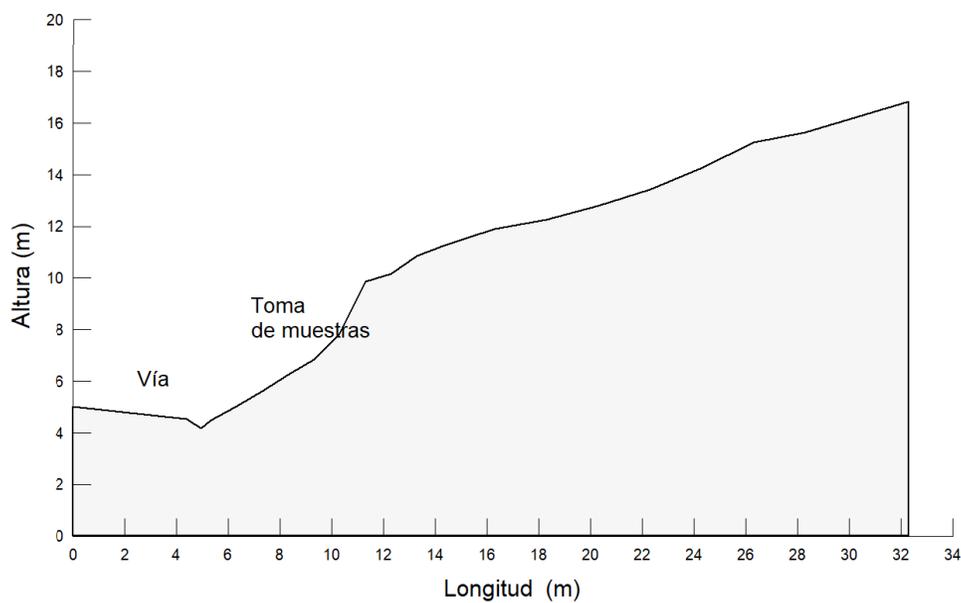


Figura 3.21 Perfil del talud de estudio Cerro El Volador

Después del análisis de estabilidad y el cálculo de los factores de seguridad determinísticos, se obtienen los factores de seguridad probabilísticos, a partir de métodos que permiten evaluar la distribución de probabilidad de una variable dependiente en función del conocimiento de las distribuciones estadísticas de las variables independientes, las cuales generan la variable dependiente. En el caso del factor de seguridad de la estabilidad de un talud se determina su curva de distribución de probabilidad a partir de las distribuciones estadísticas de las variables de cohesión, ángulo de fricción y peso específico. De esta distribución se puede determinar la probabilidad de ruptura, definida como el área bajo la curva de la distribución de probabilidad del FS menor a 1; probabilidad que se calculó en cada caso, con y sin nutriente, con base en el métodos estadístico de FOSM (First-Order Second-Moment), que permite calcular el peso de cada variable independiente en la variación de la variable dependiente (FS) (Valencia, Assis, & Camapum de Carvalho, 2005).

Según lo expuesto en (Montoya & Assis, 2011), las ventajas del método radican en que los cálculos matemáticos son simplificados y que 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, $F(X_1, X_2, \dots, X_N)$, conservando solamente los términos lineales en la Serie de Taylor, produce:

$$E[F] = F(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N)$$

$$V[F] = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\delta F_i}{\delta x_i} \right)^2 V(x_i)$$

Donde:

\bar{x}_N = Valor medio del parámetro x_N

$E[F]$ = Valor medio esperado para F

$V[F]$ = Varianza de F , igual al cuadrado de su desviación estándar

δF_i = Varianza de F , que ocurre cuando se varía δx_i , para cada uno de los N parámetros x_i

δx_i = tasa de variación de las variables envueltas en el estudio

$V(x_i)$ = Varianza de cada uno de los parámetros x_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. Los valores de las derivadas pueden ser obtenidos mediante el cálculo analítico, pero es más usual y recomendable usar la aproximación numérica presentada por J. T. Christian (1994) citado por (Montoya & Assis, 2011):

$$\frac{\delta F}{\delta x} = \frac{F(x_i + \Delta x_i) - F(x_i)}{\Delta x_i}$$

La probabilidad de falla será calculada con ayuda del valor medio del factor de seguridad calculado de los factores de seguridad resultantes de la variación de cada uno de los parámetros del suelo, la varianza del factor de seguridad, calculado por el método FOSM y con base en el área bajo la curva de distribución normal de probabilidades contenida a la izquierda de un factor de seguridad igual a 1.

La tasa de variación x_i de las variables envueltas en el estudio se calcularon con una estimativa inicial sugerida de variación del 10%, así, $\delta x_i = 0.10x_i$.

El cálculo de la variación del factor de seguridad δF_i , cuando es variado un parámetro x_i en una tasa de variación δx_i , está dado por: $\delta F_i = F_s(x_i + \delta x_i) - F_{s\text{medio}}$.

También se calculó la contribución relativa, en porcentaje, que cada parámetro ejerce sobre la varianza del factor de seguridad, así: %contribución = $v[x_i]/v[F_s]*100$.

La desviación estándar de cada uno de los parámetros x_i , como la cohesión, ángulo de fricción y peso específico se calculó con ayuda de un coeficiente de variación con valores típicos según Montoya & Assis (2011), como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Valores típicos de coeficientes de variación (Montoya & Assis, 2011)

Parámetro	Coefficiente de variación
Peso específico	03 (02-08)
Cohesión	40 (20-80)
Ángulo de fricción	10 (04-20)
Cohesión no drenada	30 (20-50)

Adicionalmente, es clara la relevancia de la aplicabilidad de los métodos probabilísticos frente a los métodos determinísticos, ya que permiten tener la probabilidad de ruptura, además del Factor de Seguridad, valor importante ya que, solamente el valor del Factor de Seguridad no da la información sobre la posibilidad de ruptura del talud.

4 Presentación y análisis de resultados

En este capítulo se presentarán los resultados de cada uno de los ensayos, con base en lo estipulado en el capítulo de metodología; además se presentarán los resultados del análisis de estabilidad del talud, el factor de seguridad y la probabilidad de falla de cada situación utilizando el método *First-Order Second-Moment* (FOSM); los resultados se mostrarán en tablas y gráficos conjuntamente tanto para suelo sin tratar al cual denominaremos en adelante Sin B4 y suelo tratado con nutriente precipitador de carbonato de calcio denominado en adelante Con B4.

4.3 Caracterización Física

4.1.1. Humedad Natural

Para cada toma de muestras se realizaron como mínimo tres ensayos de contenido de humedad, de los cuales se adoptó la media, los valores de humedad gravimétrica en cada momento de toma de muestras se presentan en la Tabla 4.1, así como la fecha del muestreo.

Tabla 4.1 Humedad Natural w (%) en la toma de muestras

Fecha muestreo	w (%)	
	Sin B4	Con B4
29/08/17	33	
23/11/17	38	
20/07/18		36
21/07/18		34

4.1.2. Gravedad Específica

Se obtuvieron resultados de la gravedad específica de los sólidos del suelo de dos repeticiones realizadas por cada uno de los métodos descritos, el método picnómetro de fondo plano y el método de picnómetro de Gas (pentapicnómetro). Se trabajará con los valores del pentapicnómetro, pues este método no acumula errores de calibración de picnómetros ni errores en el pesaje de los frascos, así como tampoco errores en extracción de las burbujas de aire. Los resultados se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Gravedad específica de los sólidos

Método	Sin B4	Con B4
Picnómetro	2.79	2.81
	2.78	2.80
Pentapicnómetro	2.81	2.82
	2.81	2.84

Para determinar el peso específico del suelo, se tomaron los promedios de los resultados del ensayo de picnómetro de gas ($G_s=2.81$, para el suelo Sin B4 y $G_s=2.83$ para el suelo el suelo Con B4), resultando en un peso específico de **27.57 kN/m³** para suelo Sin B4 y **27.76 kN /m³** para suelo Con B4 respectivamente. A partir de este ensayo, no es posible observar si existe algún efecto por la adición del nutriente ya que los valores no son significativamente diferentes. Aunque los valores un poco superiores en las muestras con B4 podrían reflejar una agregación mayor; en el caso Sin B4, se tendría una mayor hidratación y por ende un menor valor de peso específico.

4.1.3. Granulometría

La Figura 4.1. muestra el resultado del ensayo de granulometría mecánica para la fracción gruesa y la Figura 4.2 el ensayo por hidrómetro para la fracción fina obtenidos según las normas ASTM D6913 (2017) y ASTM D7928 (2017), respectivamente. Se puede observar de la primera gráfica que más del 98 % de suelo pasa el tamiz No. 200, será por tanto el ensayo de hidrómetro el que nos represente el comportamiento del suelo con y sin B4. Además, es claro que la adición del nutriente no refleja un efecto en los tamaños de textura gruesa.

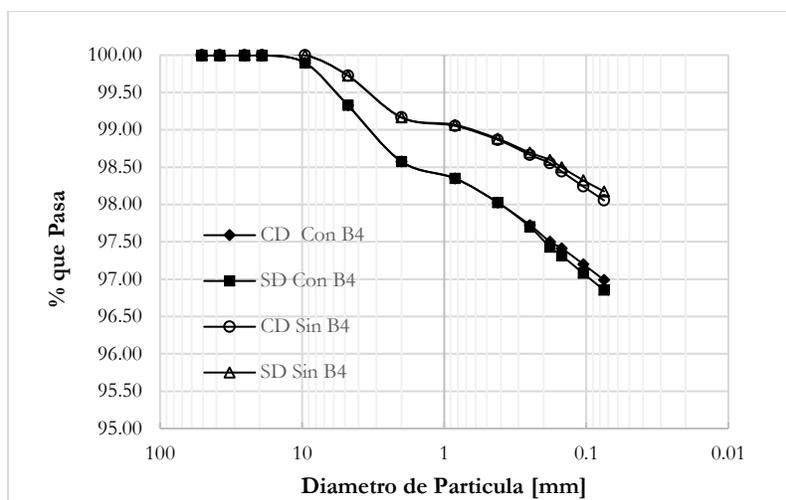


Figura 4.1 Curva Granulométrica ensayo mecánico fracción gruesa.

En el ensayo de granulometría por hidrómetro, tanto con y sin nutriente, la desagregación que genera el defloculante, indica que el suelo presenta agregaciones, siendo estas un poco más marcadas en el suelo tratado con B4. Ahora en cuanto al ensayo realizado sin defloculante (SD), se presenta una leve similitud en el resultado entre el suelo natural y tratado, aunque podría decirse que con el nutriente, el suelo tiende a agregarse levemente para los granos tamaño limo; por otro lado con el uso del defloculante (CD) se puede apreciar que el suelo con nutriente levemente se desagrega más que en el suelo sin nutriente, lo cual puede deberse probablemente a que el pH del suelo tratado es un poco mayor que el pH del suelo sin tratar (observar resultados químicos), favoreciendo la actuación del defloculante. Según (Santos, 1975), cuando es usado el defloculante la superficie de las arcillas con una carga negativa absorbida (iones OH⁻) pasa a funcionar como condensador eléctrico cargado propiciando así su repulsión y al adicionar carga positiva al medio, como es el caso del calcio, éste ayuda a la repulsión.

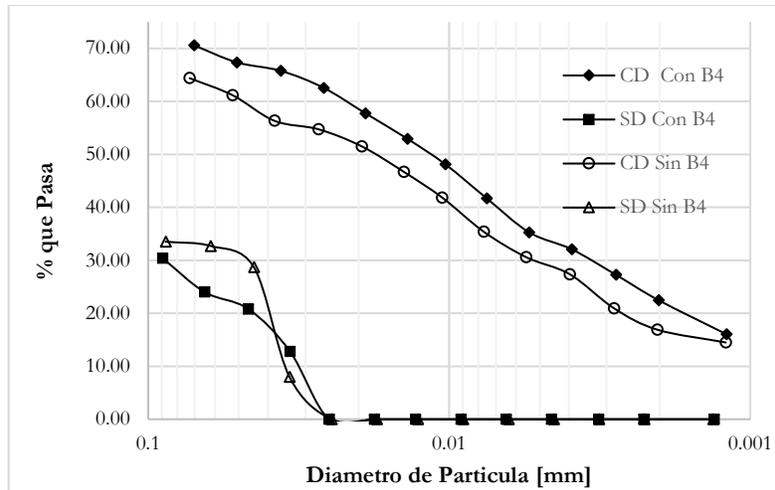


Figura 4.2 Curva Granulométrica ensayo por hidrómetro fracción fina

Se procede a continuación a evaluar las características de las agregaciones, con base en la curva granulométrica y las fórmulas dadas por (Araki, 1997), donde se tienen dos parámetros, los Agregados Totales (A.T.) que indican la estabilidad de dichas agregaciones, si este valor es mayor, mayor será la inestabilidad de las agregaciones; y el Contenido de Agregaciones (C.A.), que indica que porcentaje del suelo que está agregado es arcilla.

$A.T.\% = \% \text{ tama\~{n}os arcilla con defloculante} - \% \text{ tama\~{n}os arcilla Sin defloculante}$

$C.A.\% = \frac{\% \text{ tama\~{n}os arcilla con defloculante} - \% \text{ tama\~{n}os arcilla Sin defloculante}}{\% \text{ tama\~{n}os arcilla con defloculante}}$

Donde el porcentaje tama\~{n}os arcilla se define con el porcentaje que pasa un diámetro de 2 micras.

Los resultados de esta evaluación se muestran en la Tabla 4.3. de la cual se puede inferir, que el suelo con el nutriente presenta mayores agregaciones, pero un poco más inestables, si se tiene presencia de aguas de tipo residual, que aquel al que no le fue adicionado nutriente. Además, el 100% de dichas agregaciones son de las partículas tamaño arcilla.

Tabla 4.3 Características de las Agregaciones

Parámetro	Sin B4	Con B4
A.T %	17	23
C.A %	100	100

Para evaluar que puede suceder con el suelo inmediatamente se agrega el nutriente, se realizó el procedimiento anterior, pero para muestras de suelo con B4 a un día de adición, los resultados se muestran en la Figura 4.3 y la Tabla 4.4; de los cuales se puede deducir que el suelo con nutriente solo (agua) el primer día, desagrega levemente las partículas del suelo (región de textura limo), pero estas son un poco más estables que en el suelo sin B4 frente a la acción del defloculante (curva CD por debajo de la curva CD sin B4). Se concluye entonces que, si bien el primer día hay una tendencia leve a desagregar, pasados 15 días el efecto del nutriente favorece la agregación de las partículas.

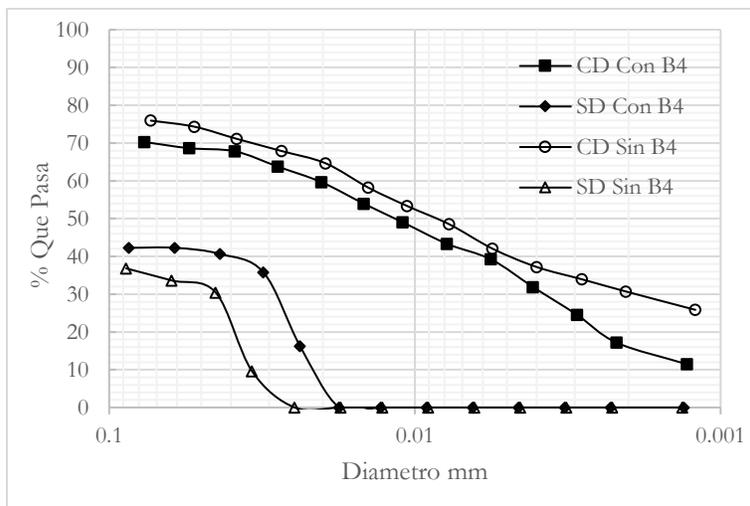


Figura 4.3 Curva granulométrica 1 día de curado

Tabla 4.4 características de agregaciones 1 día de curado

Parámetro	Sin B4	Con B4
A.T %	30	17
C.A %	100	100

4.1.4. Límites de Consistencia

La tabla 4.5. muestra los resultados del ensayo de límites de consistencia o límites de Atterberg realizados al suelo tanto con B4 como sin él, donde se puede deducir, que la adición del nutriente, si bien no refleja un cambio considerable en el índice de plasticidad, si disminuyó el límite líquido y el límite plástico; disminución que, posiblemente se da, por la adición de cationes de calcio Ca^{+} que aporta el nutriente, como lo explica (Santos, 1975).

Tabla 4.5 Límites de Consistencia

Parámetro	Sin B4	Con B4
LP	52	46
LL	84	81
IP	32	35
SUCS	MH	MH

Para clasificar el suelo de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación SUCS, se determina que más del 50% del suelo pasa el tamiz No. 200, por lo que el suelo es de textura fina. Con ayuda del límite líquido y el índice de plasticidad, entrando en la carta de plasticidad de Casagrande, se clasifica el material como un limo de alta plasticidad MH tanto con y sin B4. La Figura 4.4. ilustra la carta de plasticidad y la clasificación del suelo; en conclusión, el tratamiento no modifico la clasificación unificada del material.

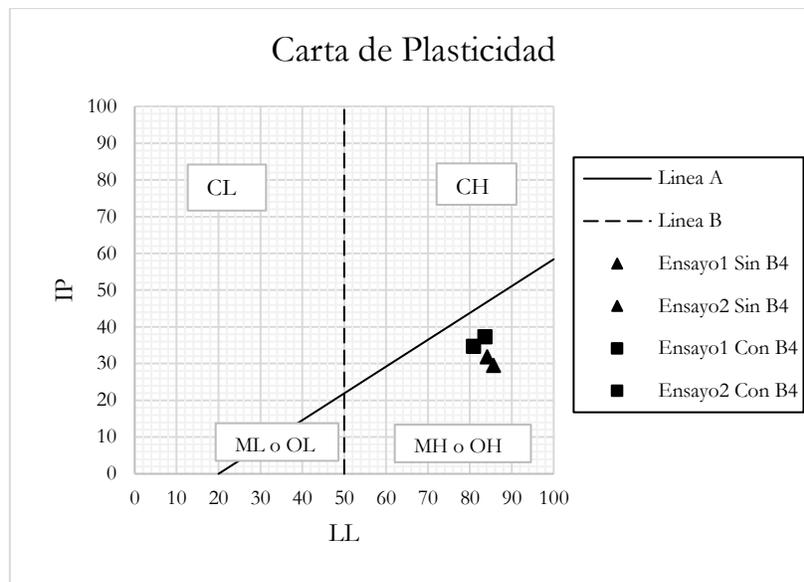


Figura 4.4 Carta de Plasticidad

4.1.5 Clasificación MCT

De acuerdo con la metodología de Nogami y Villibor (1995) y después de obtenidos los resultados del ensayo de clasificación MCT, se infiere que el suelo con y sin nutriente se clasifica como LG', Arcillas lateríticas y arcillas lateríticas arenosas, que constituyen el horizonte B de los suelos conocidos pedológicamente como latosoles o suelos podzolicos y tierras purpura estructuradas (Nogami & Villibor, 1995), los resultados se muestran en la Tabla 4.6. Adicionalmente, en los resultados de DRX, se puede ver presencia de arcillas (caolinita) y presencia de óxidos de hierro (Goetita), corroborando dicha clasificación.

Tabla 4.6 Clasificación MCT

	Anillo	C'	Penetración mm	Grupo MCT
Sin B4	1	2	1	LG'
	2	1.9	1	LG'
	3	1.9	1	LG'
	4	2	1	LG'
	5	1.8	1	LG'
Con B4	6	2.12	0.5	LG'
	7	2.12	0.5	LG'
	8	2.12	0.5	LG'
	9	2.11	0.5	LG'
	10	2.14	0.5	LG'

De estos resultados se puede observar que el suelo tratado con B4 tiende a agregar más, por ende, se tienen mayores valores de contracción que para el suelo sin B4; tornándolo de igual forma, menos penetrable.

4.2 Caracterización Química

La Tabla 4.7 muestra los resultados de la caracterización química del suelo con y sin nutriente precipitador de carbonato de calcio, en ella se describen los contenidos de iones de calcio (Ca), aluminio (Al), magnesio (Mg), fósforo (P) y potasio (K), así como el contenido de materia orgánica, la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva (CICE) y el potencial Hidrogeno pH.

Tabla 4.7 Caracterización Química

Parámetro	Sin B4	Con B4
Ca (cmolc kg ⁻¹)	0.2	5
Al (cmolc kg ⁻¹)	2.2	-
Mg (cmolc kg ⁻¹)	0.22	0.36
P (cmolc kg ⁻¹)	2	2
K (cmolc kg ⁻¹)	0.02	0.05
CICE	2.6	5.4
M.O.%	0.23	0.25
pH_{KCL}	4.14	6.13
pH_{agua}	4.8	5.3
ΔpH	-0.66	0.53
PZC	3.48	6.96

De los resultados del pH se puede concluir que, en el suelo sin nutriente, al ser el ΔpH menor a cero, se tiene indicios de que predominan arcillominerales, como se muestra en los resultados de drx; en contraste el suelo con nutriente, tiene un valor de ΔpH mayor a cero, lo cual no indica predominio de óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio, si no que realmente indica, cambio de cargas negativas a cargas positivas del medio, generadas, ya sea por la adición del nutriente o por la atracción que el mismo origina en las bacterias Gram-positivas, principales precipitadores de carbonato de calcio (Valencia, 2009).

Por otro lado, el pH del suelo con B4 de 5.3, es menor que su correspondiente valor de PZC 6.96, indicando la posibilidad de flocular el suelo; contrario al pH del suelo natural 4.8, el cual es mayor a su correspondiente valor de PZC 3.48, lo cual favorece la capacidad de intercambio catiónico, dispersando el suelo; por tanto, la adición de nutriente posibilita la agregación del suelo, al igual de cómo se mostró en los ensayos de granulometría y de clasificación MCT.

De los cationes analizados, solo se observa un aumento significativo en el calcio Ca, sin embargo, el método de análisis solo capta cationes totales, así que no se podría decir que es por la presencia de carbonato de calcio, por lo que posiblemente la diferencia se deba a la adición en si del nutriente a base de acetato de calcio.

4.3 Caracterización Mineralógica

4.3.1 Difracción de Rayos X (DRX)

Las Figuras 4.5 y 4.6 muestran los difractogramas de los resultados del ensayo Difracción de Rayos X (DRX), con su respectiva caracterización mineralógica para el suelo con y sin nutriente.

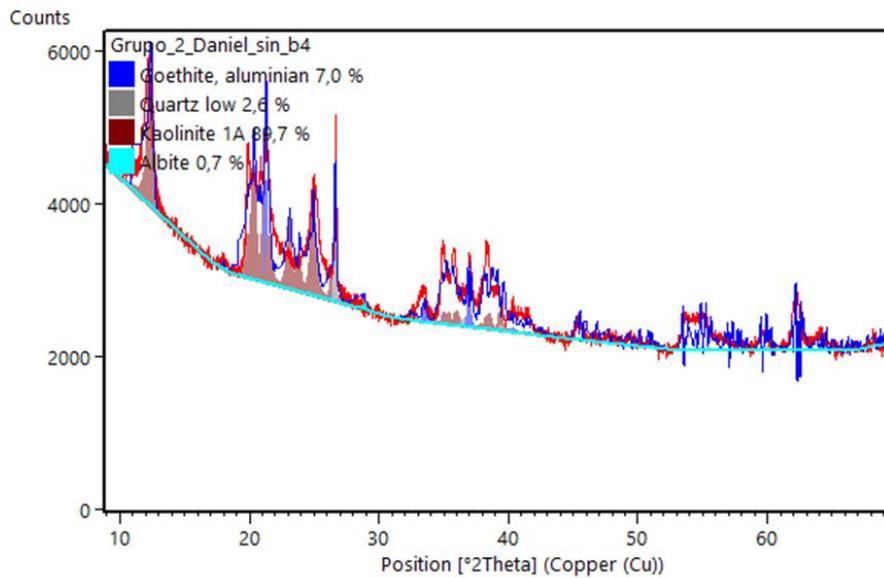


Figura 4.5 DRX suelo Sin B4

Con base en los difractogramas del ensayo se puede analizar la intensidad de los picos principales de los minerales presentes en el suelo, de los cuales se aprecian 4 fases de minerales, Goetita, Cuarzo, Caolinita, Albita, con el mineral de Caolinita en mayor proporción, lo que indica la meteorización del feldespato Plagioclasa que se encuentra en los Metagabros de la geología del lugar, mostrando el nivel de meteorización del suelo. Por otro lado, se cuenta con la presencia un poco de goetita (segunda en proporción), la cual se debe también a la meteorización de los minerales del Metagabro tales como piroxeno y anfíboles los cuales son ricos en hierro.

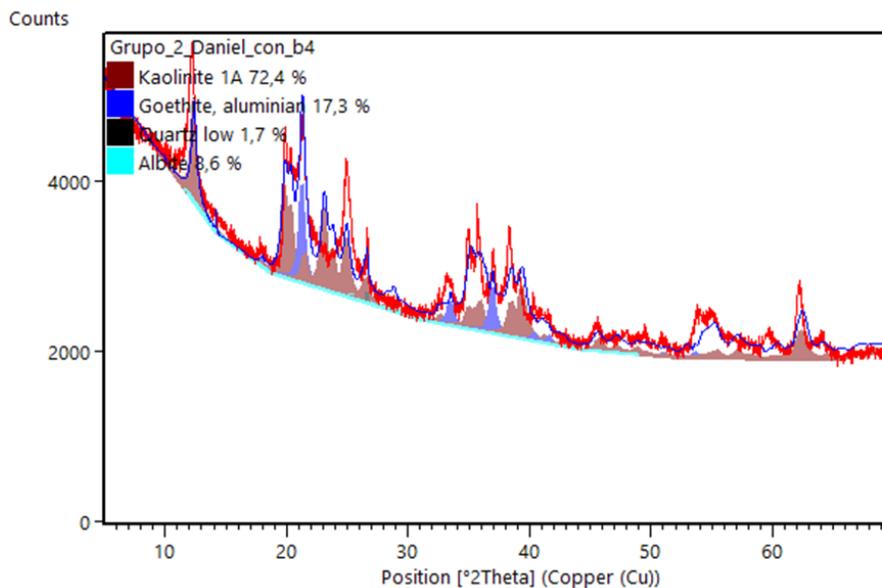


Figura 4.6 DRX Suelo con B4

Para la muestra con B4 se encuentran las mismas cuatro fases de los minerales presentes en el suelo sin B4, Goetita, Cuarzo, Caolinita, Albita, de las cuales no se observa diferencias significativas a excepción de la goetita, la cual pasa de 7% al 17.3%, que no representa un cambio significativo y que puede deberse simplemente a variaciones por muestreo; además la adición del nutriente no debería cambiar la mineralogía del suelo, la única alteración sería el eventual surgimiento de carbonato de calcio, el cual no es apreciado por el ensayo.

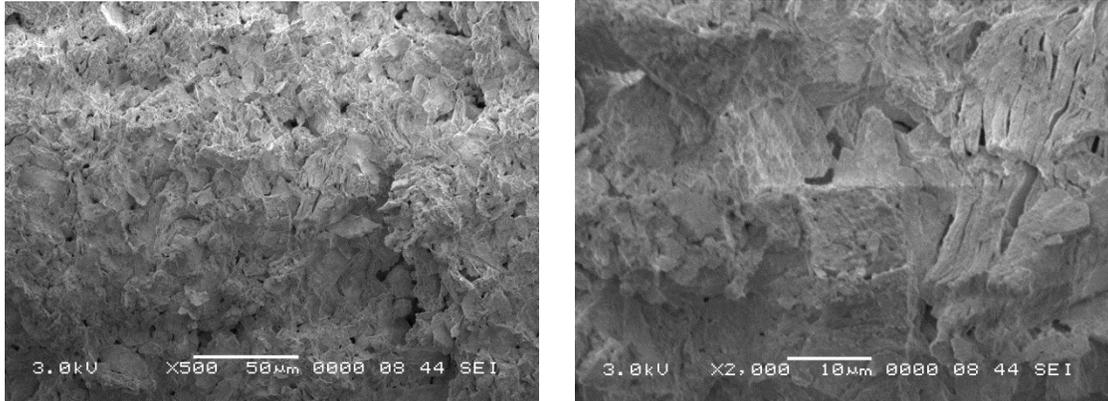
Los resultados del ensayo DRX se muestran en la Tabla 4.8

Tabla 4.8 Resultados ensayo DRX

Mineral	Sin B4	Con B4
Goetita	7%	17%
Cuarzo	3%	2%
Caolinita	90%	72%
Albita	1%	9%

4.3.2 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

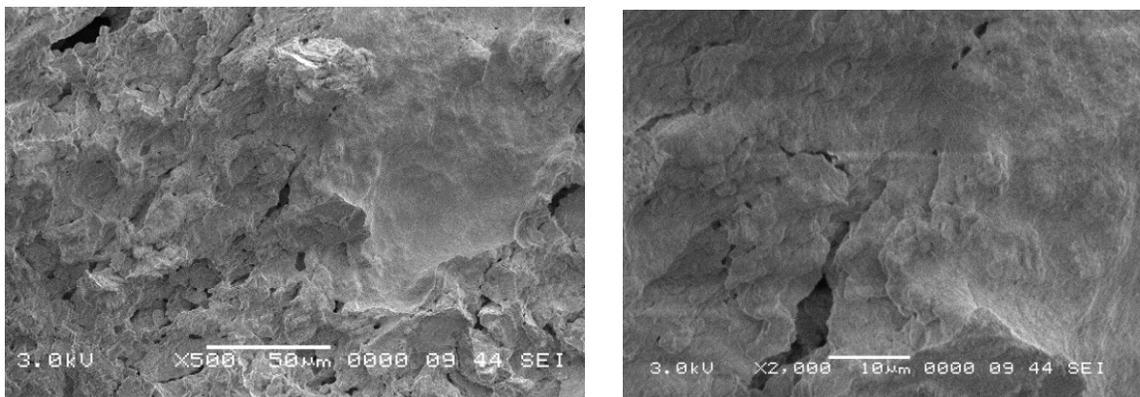
Para poder establecer las características de la estructura del suelo, los resultados de la microscopia electrónica de barrido son presentados en la Figura 4.7 y 4.8. donde se tienen las imágenes del suelo con y sin nutriente.



a) 500 aumentos

b) 2.000 aumentos

Figura 4.7 Imagen en MEB suelo sin B4



a) 500 aumentos

b) 2.000 aumentos

Figura 4.8 Imagen MEB suelo con B4

De las imágenes se puede decir, que si bien, no se aprecia la formación de cristales de carbonato de calcio, se puede observar una estructura más continua (o densificada) en la muestra con B4. Es importante, tener en cuenta que las imágenes podrían variar de un punto a otro, debido al tamaño de la muestra requerida para el ensayo.

4.4 Caracterización Mecánica

4.4.2 Curva Característica

En la Figura 4.13 se muestran las gráficas resultantes del ensayo de succión matricial y total por el método del papel filtro. Se puede observar que la curva de succión matricial sin B4, presenta un leve comportamiento bimodal más marcado que la curva con B4, confirmando como se observó en la MEB una estructura más homogénea en el suelo tratado, y una con mayor presencia de poros en el suelo sin tratar. Adicionalmente, se puede decir que, el suelo tratado con nutriente presenta succiones matriciales mayores en la zona de los poros intermedios (contenidos de humedad entre el 15% y 35%). Para las otras zonas, la diferencia de succión no es muy apreciable entre el suelo con o sin nutriente; lo anterior se ve reflejado en los ensayos de corte directo, ya que como éstos se efectúan en estado saturado, los valores de resistencia no estarían influenciados por la succión, sino por las agregaciones químicas, que ejercerían influencia en la cohesión.

También se muestran succiones totales mayores en el suelo con B4, esto por la presencia de sustancias químicas en el agua circundante de la muestra tratada.

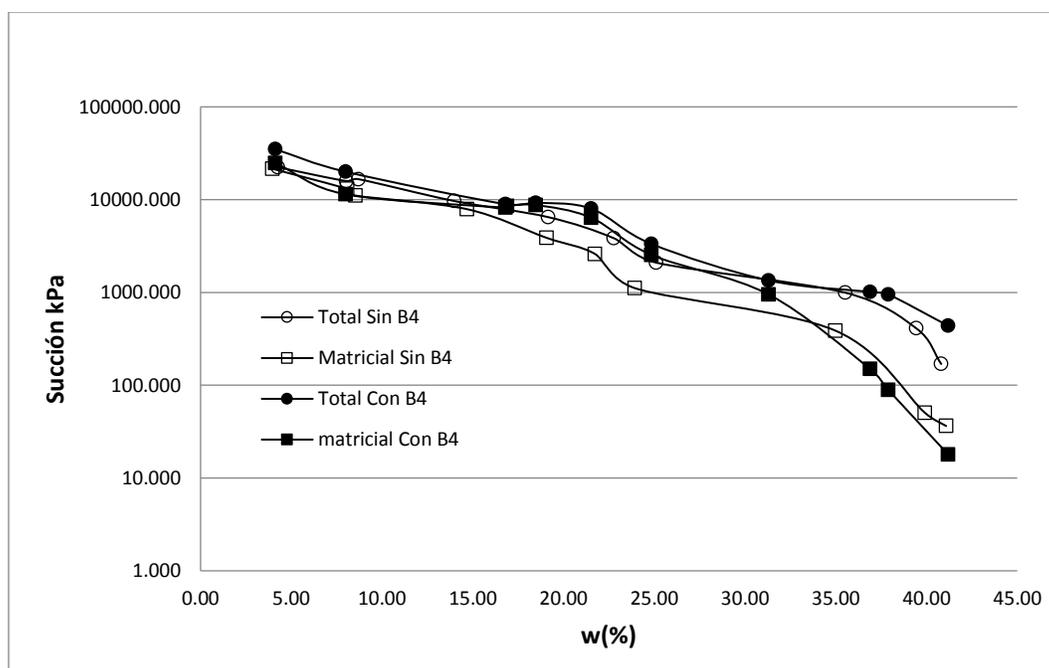


Figura 4.9 Succión Vs Humedad

Para realizar un análisis más completo y tratar explicar de forma más clara el comportamiento de la curva característica, se elaboró la gráfica de succión matricial y total versus la saturación la cual se muestra en la Figura 4.14, donde el suelo con nutriente presenta una leve mejoría en el valor de la succión respecto del suelo natural, tanto en la curva de la succión total y la succión matricial.

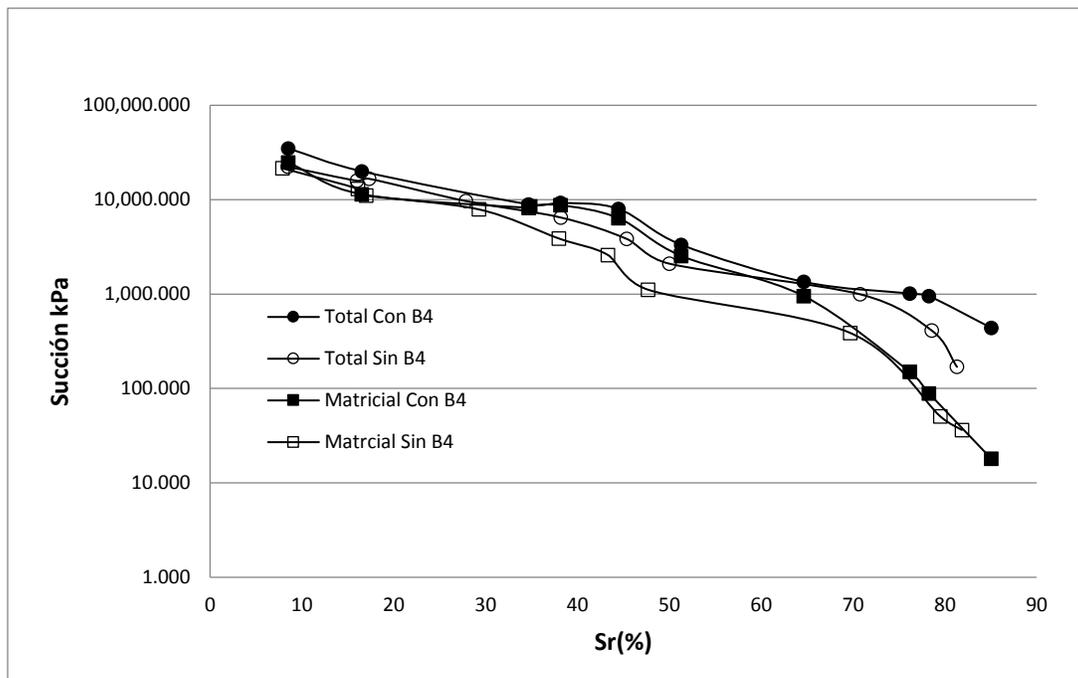


Figura 4.10 Succión Vs Saturación Sr (%)

Para facilitar aún más el estudio del comportamiento de la curva característica del suelo con y sin nutriente, se empleó la metodología propuesta Camapum de Carvalho & Leroueil (2004), denominada la Curva Característica Transformada, obtenida utilizando en uno de los ejes la succión en pF (pF es el logaritmo de succión en centímetros de una columna de agua por la relación de vacío del suelo, la succión en pF se puede calcular a partir de la succión en kPa , una unidad más utilizada en geotecnia, tomando el logaritmo (base 10) y multiplicándolo por un factor de 10, luego dividida por el índice de vacíos de las muestras (Camapum de Carvalho & Leroueil, 2004).

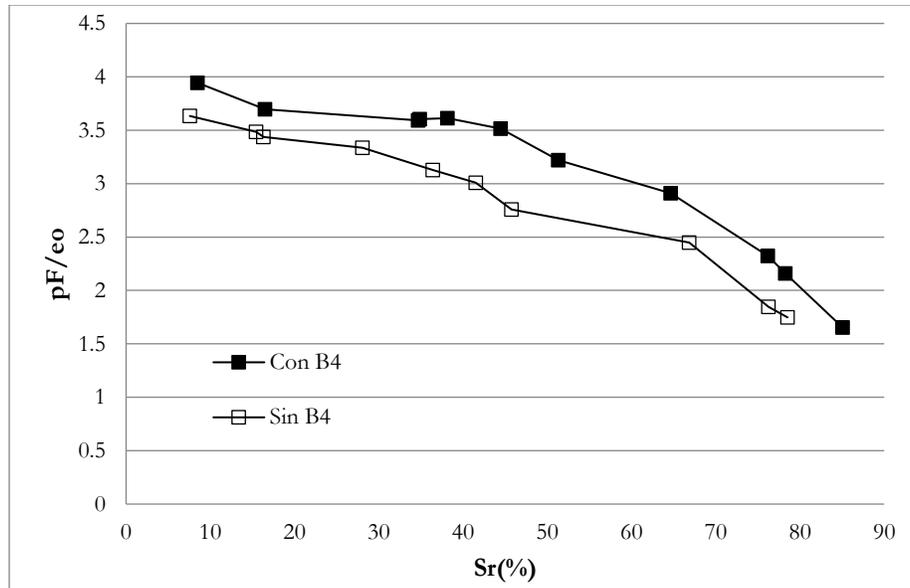


Figura 4.11 Succión Matricial pF/eo Vs Humedad.

De la gráfica se puede deducir que al presentarse tan similares las succiones, los índices de vacíos en el suelo con B4 son menores, y por ende la curva se presenta por encima del suelo sin B4, afirmando que existe una densificación de la muestra, que gobernará en general el comportamiento de las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo.

4.2.3 Permeabilidad

Para el modelamiento de las propiedades hidráulicas del suelo en el software de estabilidad y ver su relación con la estabilidad del talud, se realizó la correlación entre la curva característica y la permeabilidad saturada, que en este caso es de $7,85E^{-05}$ cm/s para el suelo sin nutriente y de $2,46E^{-05}$ cm/s para el suelo con B4. Para determinar así la función de permeabilidad del suelo $K_w(\theta w)_i$, la correlación se realizó por método estadístico utilizando las fórmulas descritas en (Fredlund et al., 2012), la Gráfica 4.16 muestra los datos de la función de permeabilidad para los dos casos, con y sin nutriente.

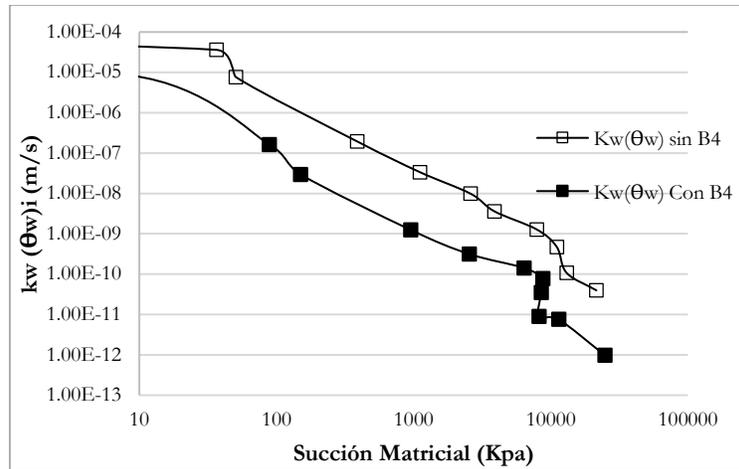


Figura 4.12 función de permeabilidad $K_w(\theta_w)_i$

De la gráfica se puede decir que el suelo con B4 presenta menor permeabilidad que el suelo sin B4 y esto debido a la agregación que genera la adición del nutriente.

4.5 Calculo de estabilidad de talud

A continuación, se presenta los resultados, obtenidos de la modelación del talud de suelo residual del cerro El Volador, en el software de estabilidad GeoStudio, Student Edition 8.15.1.11236 de 2012, con las propiedades geotécnicas descritas en las diferentes caracterizaciones analizadas atrás, en condiciones estáticas y dinámicas, que permitan ver como mejora el FS al usar el nutriente.

La Figura 4.17 muestra el diagrama de distribución de presión de poros después de ser modelado un evento de lluvia, el cual es igual tanto para el caso del suelo Con y Sin B4 (las flechas azules sobre la superficie del talud muestran la forma en que se aplica la lluvia al suelo).

La Figura 4.18 muestra el resultado del análisis inicial estático en el módulo QUAKE/W donde se modelará el espectro de diseño para el sitio de estudio, este diagrama es el igual para el suelo con y sin B4, el cual es necesario para rodar después el análisis equivalente lineal dinámico, que aplica la fuerza horizontal de sismo y así poder comparar el movimiento.

la Figura 4.19 se ilustra el resultado del análisis lineal dinámico al aplicar el espectro de diseño al modelo.

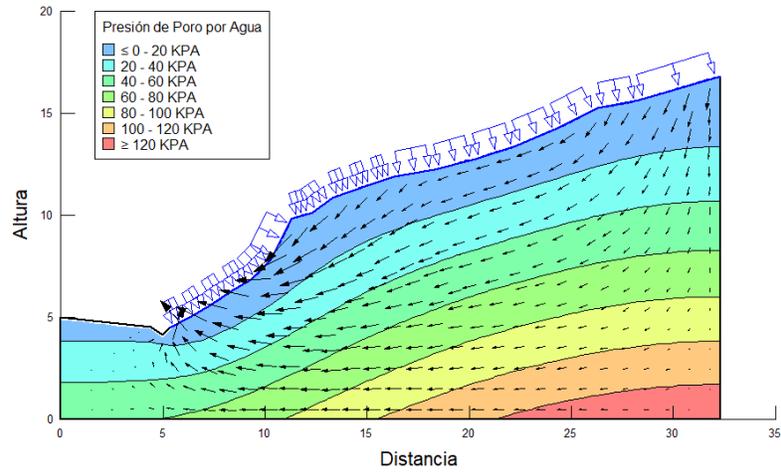


Figura 4.13 Presión de poros Sin B4

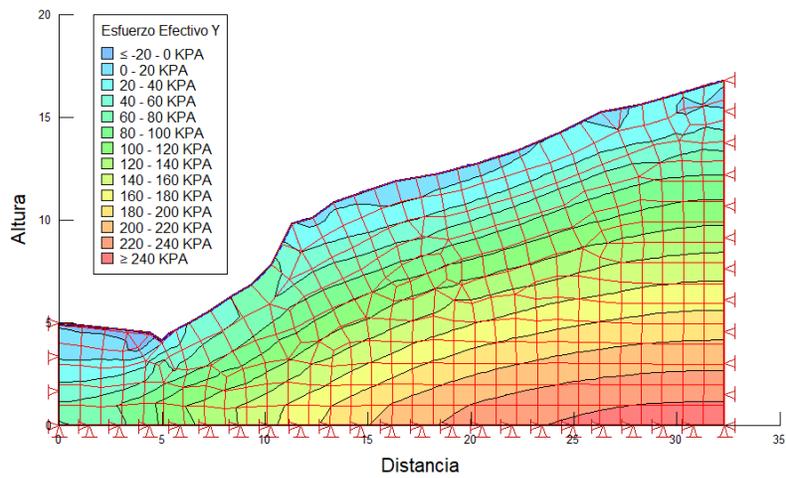


Figura 4.14 Análisis inicial estático en QUAKE/W

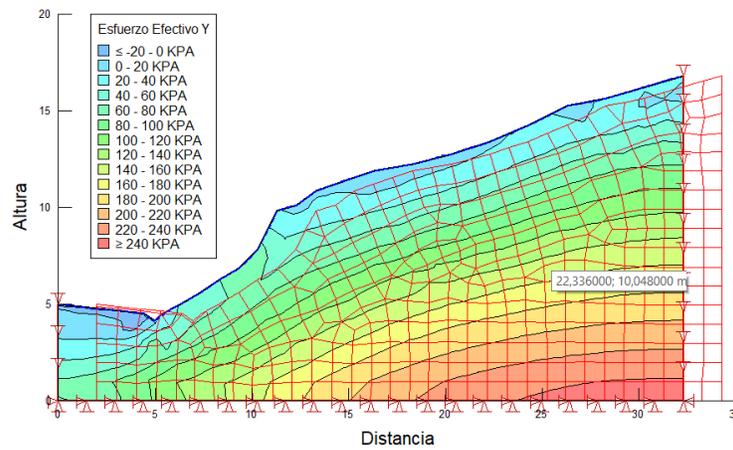


Figura 4.15 Análisis Equivalente Lineal Dinámico en QUAKE/W

Las Figuras 4.20 y 4.21 presentan los resultados del análisis de estabilidad para el talud sin B4, antes y después de la aplicación de la fuerza horizontal de sismo en el modelo, en donde se puede observar el factor de seguridad mínimo y la superficie de falla circular crítica.

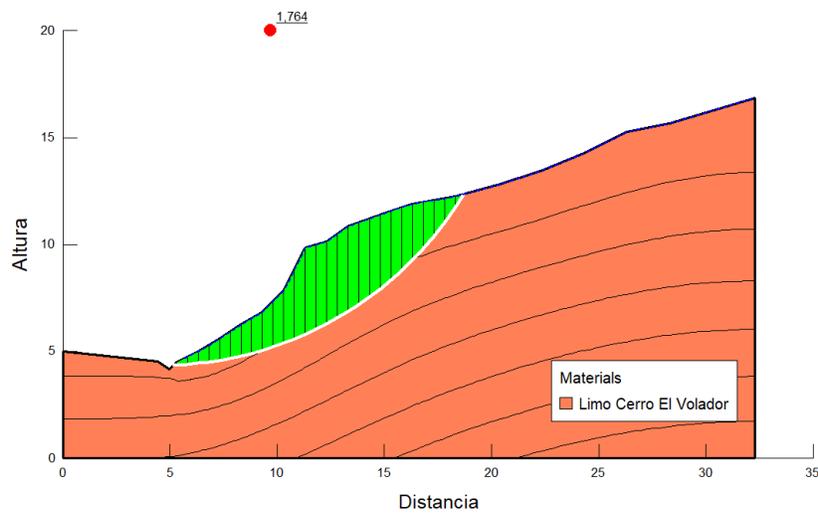


Figura 4.16 FS Sin B4 Estático

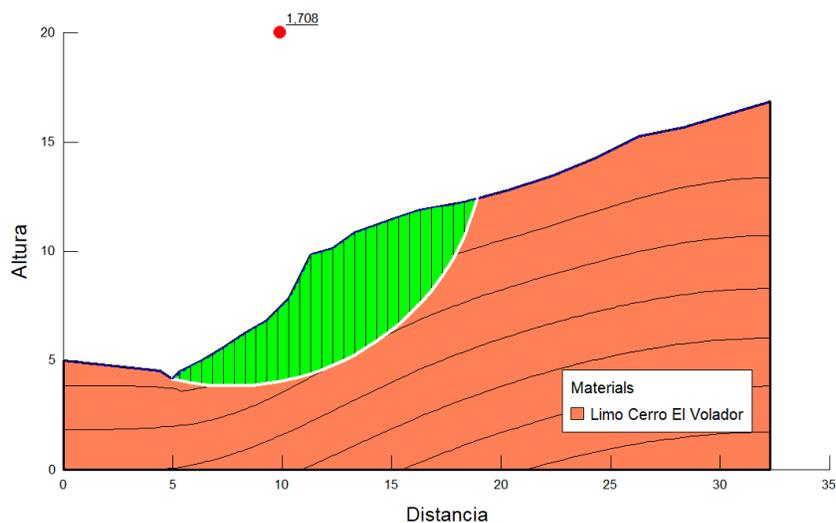


Figura 4.17 FS Sin B4 con Sismo

En las Figuras 4.22 y 4.23 se presentan los resultados del análisis de estabilidad para el talud Con B4, antes y después de la aplicación de la fuerza horizontal de sismo en el modelo, en donde se puede observar el factor de seguridad mínimo y la superficie de falla circular crítica.

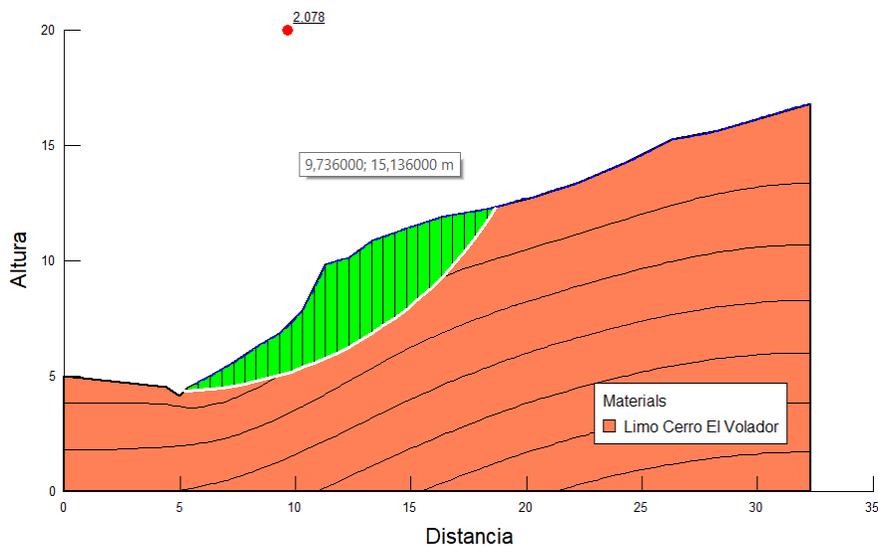


Figura 4.18 FS con B4 Estático

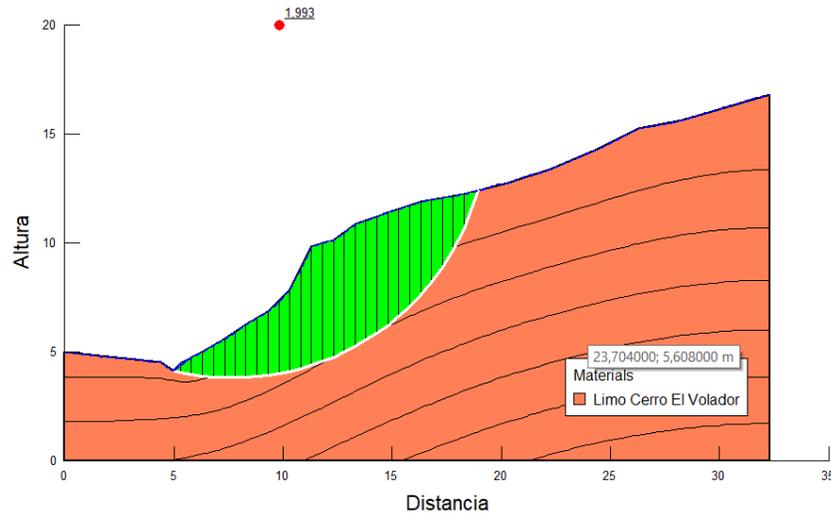


Figura 4.19 FS Con B4 con Sismo

Después de realizar el análisis de estabilidad convencional por equilibrio límite teniendo en cuenta el sismo de diseño para el lugar de estudio y el modelamiento de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo, se calcularon los factores de seguridad, Sin y Con B4, obteniendo como valores medios para estos, 1,700 y 1,993 respectivamente, con los cuales se procedió a variar en un 10% cada parámetro del suelo y recalcar el factor de seguridad, con el fin de encontrar la variación total de dicho factor de seguridad $V[Fs]$, las Tablas 4.10 y 4.11, muestran los resultados del uso de la metodología FOSM para encontrar esta variación y la probabilidad de falla del suelo natural, en a las cuales se observa que el valor de $V[Fs]$ es de 0.14 correspondiente a una desviación estándar del Fs de 0.37.

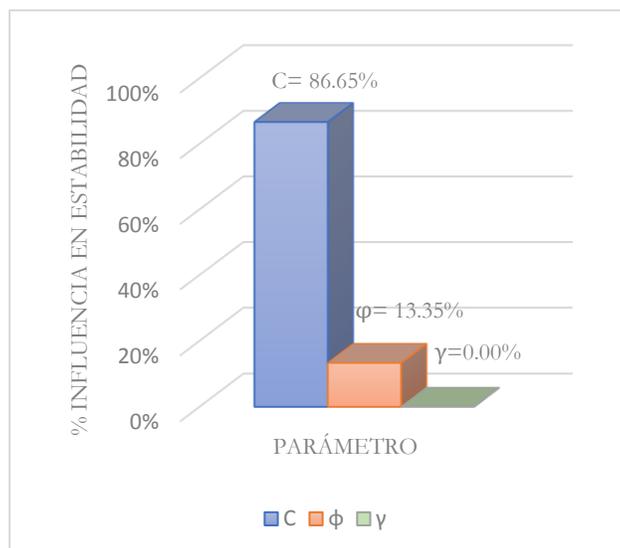
Tabla 4.9 Calculo de la $V[Fs]$ del talud suelo sin B4

Parámetro	x_i	δx_i	$x_i + \delta x_i$	F_{s_i}	δF_{s_i}	$(\delta F_{s_i} / \delta x_i)^2$	$V(x_i)$	$[\delta F_{s_i} / \delta x_i]^2 * v(x_i)$	% contribución
Cohesión C [kPa]	26	2.6	28.6	1.786	0.086	0.0011	108.16	0.12	86.651
Ángulo de Fricción φ°	35	3.5	38.5	1.835	0.135	0.0015	12.25	0.02	13.345
Peso específico γ [kN/m ³]	27.57	2.757	30.33	1.692	-0.008	0.0000	0.68	0.00	0.004
							$V[Fs]$	0.14	100.00

Tabla 4.10 Cálculo de Probabilidad de Falla Talud suelo sin B4

Fs medio	1.700
Fs variando C	1.786
Fs variando ϕ	1.835
Fs variando γ	1.692
Promedio	1.753
Desviación estándar $\sqrt{v[Fs]}$	0.370
Probabilidad de Falla %	2.08

La Figura 4.24, presenta en un diagrama de barras, la influencia en porcentaje de cada variable sobre el factor de seguridad, de la cual se observa que la cohesión es el parámetro más influyente en la estabilidad del talud de estudio, con un 86.65%.

Figura 4.20 Diagrama de influencia de los parámetros en $V[Fs]$ suelo Sin B4

La Tabla 4.12 y 4.13 muestran los correspondientes resultados del cálculo de la variación total del factor de seguridad $V[Fs]$ para el suelo tratado con B4 para el cual $V[Fs]$ es igual a 0.17 correspondiente a una desviación estándar del factor de seguridad de 0.41, así como la probabilidad de falla del talud con suelo tratado.

Tabla 4.11 Calculo de la V[Fs] del talud suelo Con B4

Parámetro	xi	δ xi	xi+ δ xi	Fsi	δ Fsi	$(\delta$ Fsi/ δ xi) ²	V(xi)	$[\delta$ Fsi/ δ xi] ² * v(xi)	% contribución
Cohesión C [kPa]	32	3.2	35.2	2.089	0.096	0.0009	163.84	0.15	86.58
Ángulo de Fricción ϕ°	38	3.8	41.8	2.144	0.151	0.0016	14.44	0.02	13.39
Peso específico γ [kN/m ³]	27.76	2.776	30.54	1.968	-0.025	0.0001	0.69	0.00	0.03
							V[F]	0.17	100.00

Tabla 4.12 Calculo de Probabilidad de Falla talud suelo con B4

Fs medio	1.993
Fs variando C	2.089
Fs variando ϕ	2.144
Fs variando γ	1.968
Promedio	2.049
Desviación estándar $\sqrt{v[fs]}$	0.413
Probabilidad de Falla %	0.55

La Figura 4.25, presenta en un diagrama de barras, la influencia en porcentaje de cada variable sobre el factor de seguridad, de la cual se observa que la cohesión es el parámetro más influyente en la estabilidad del talud de estudio, con un 86.65%.

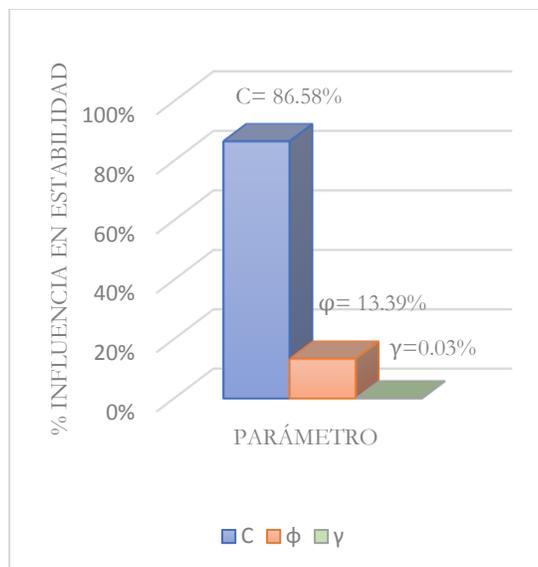


Figura 4.21 Diagrama de influencia de los parámetros en $V[Fs]$ suelo con B4

La Tabla 4.14 muestra en resumen los resultados de los factores de seguridad para cada tipo de talud modelado, así como las probabilidades de falla resultado del análisis del método probabilístico FOSM, de acuerdo con los resultados se puede ver una mejoría en el factor de seguridad del 14% y una disminución en la probabilidad de falla (Pr) del 74%.

Tabla 4.13 Factores de seguridad y Probabilidad de Falla con y sin B4

Parámetro	Sin B4	Con B4
FS	1.708	1.993
Pr	2.08	0.55

4.4.1 Resistencia al Corte Directo CD

Los resultados de estos ensayos son fundamentales en el desarrollo de esta investigación pues van a brindar los parámetros mecánicos del suelo, como la cohesión y el ángulo de fricción, con los cuales será alimentado el modelo en el software de estabilidad. Las Figuras 4.9 y 4.10 ilustran los resultados de los diferentes ensayos de corte directo consolidado drenado (4 ensayos con varios puntos cada uno, tanto para el suelo Sin B4 y con B4), donde se fallaron varias muestras de suelo a tensiones normales de 60, 120, 200 kPa, de las cuales se muestra también en porcentaje, la saturación que alcanzó cada pastilla al final del ensayo. Las Figuras 4.11 y 4.12 muestran las envolventes de falla según el criterio de Mohr-Coulomb, estas gráficas son el resultado de tomar los valores con el mayor grado de saturación al final del ensayo que garanticen el estado más crítico y la total disipación de la presión de poros (ensayo CD). Los valores definitivos se presentan en la Tabla 4.9.

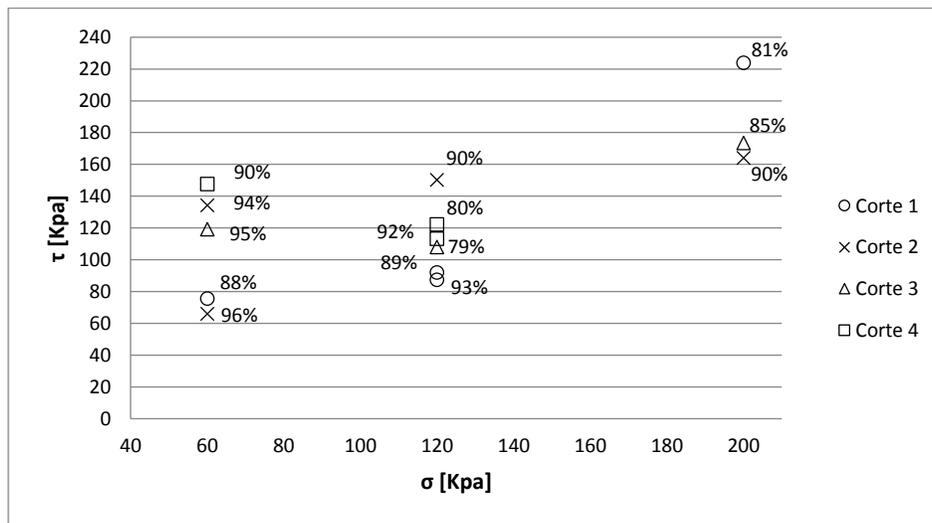


Figura 4.22 Ensayo de Corte directo CD Sin B4, con % de saturación en cada punto.

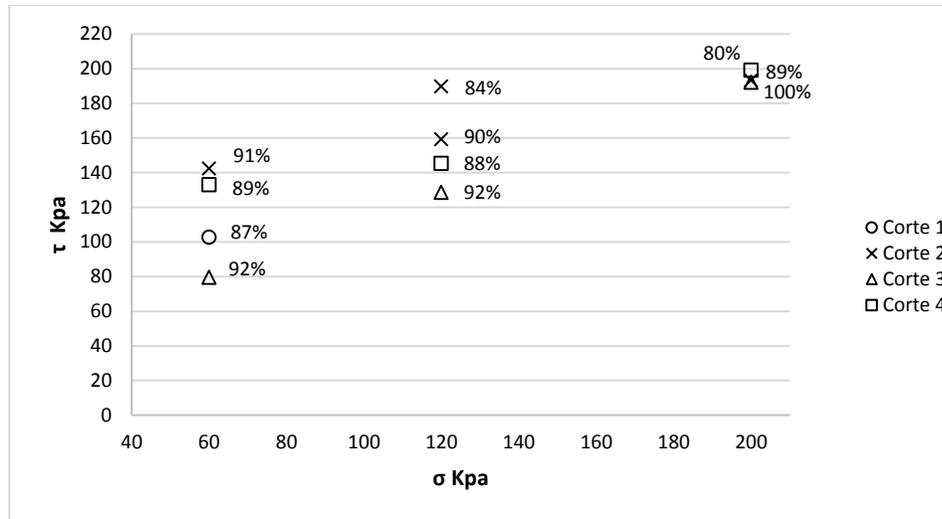


Figura 4.23 Ensayo de Corte directo CD Con B4, con % de saturación en cada punto.

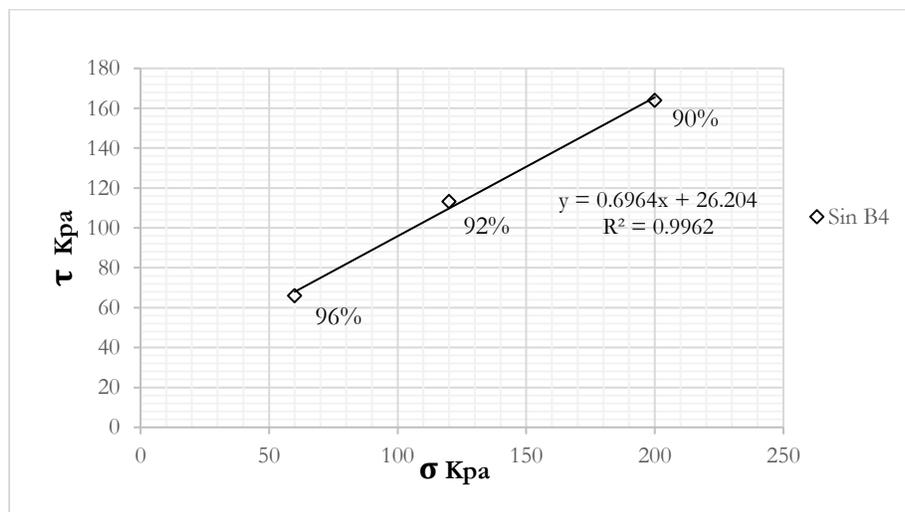


Figura 4.24 Envolvente de falla suelo Sin B4, con % de saturación en cada punto.

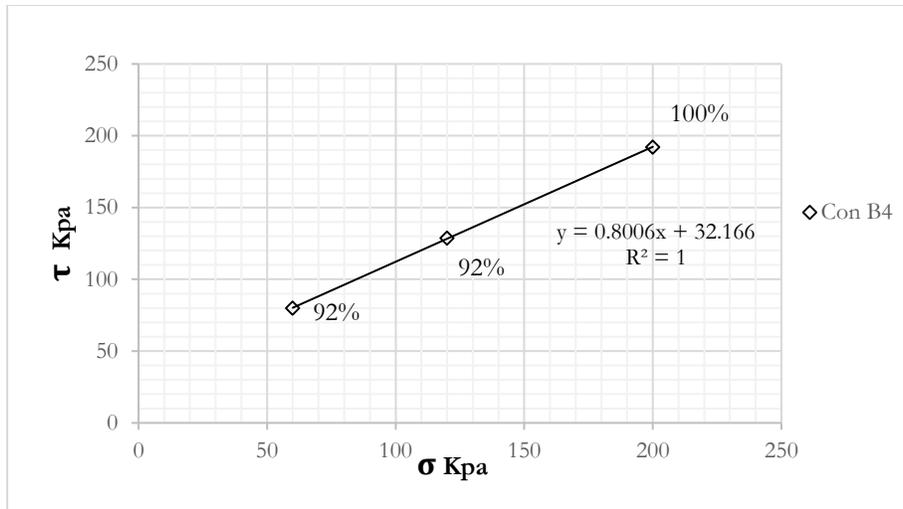


Figura 4.25 Envolvente de falla suelo Con B4, con % de saturación en cada punto.

Tabla 4.14 Parámetros mecánicos del suelo

Parámetro	Sin B4	Con B4
C' [KPa]	26	32
Φ'	35	38
γ [KN/m³]	27.57	27.76

De los datos obtenidos se puede deducir que hay un aumento en los parámetros del suelo al adicionar el nutriente, del 20% en cohesión y 8% en el ángulo de fricción, resultado corroborado con la caracterización física y química, donde se encontró que el nutriente generó agregación o densificación de suelo.

4.4.2 Curva Característica

En la Figura 4.13 se muestran los resultados del ensayo de succión matricial y total por el método del papel filtro. Se puede observar que la curva de succión matricial sin B4, presenta un comportamiento bimodal un poco más marcado que la curva de succión matricial con B4; donde, tal como se vio en las imágenes del MEB, la muestra tratada tiene una estructura más homogénea y la muestra sin tratar presenta más poros.

También se observa que, en la curva de succión total, se presentan mayores valores de succión en el suelo con nutriente, lo cual indica un efecto químico en el líquido circundante. De la curva de succión matricial, se puede

decir que, el suelo tratado con nutriente presenta succiones mayores en la zona de los poros intermedios (entre 15% y 35% de contenido de humedad); en las otras zonas no existe una diferencia marcada entre las curvas, lo anterior se ve reflejado en los ensayos de corte directo, ya que, al efectuarse éstos en estado saturado, los valores de resistencia no estarían influenciados por la succión (ya que para las máximas humedades las succiones son similares), sino por la densificación químicas que ejercerían influencia en la cohesión.

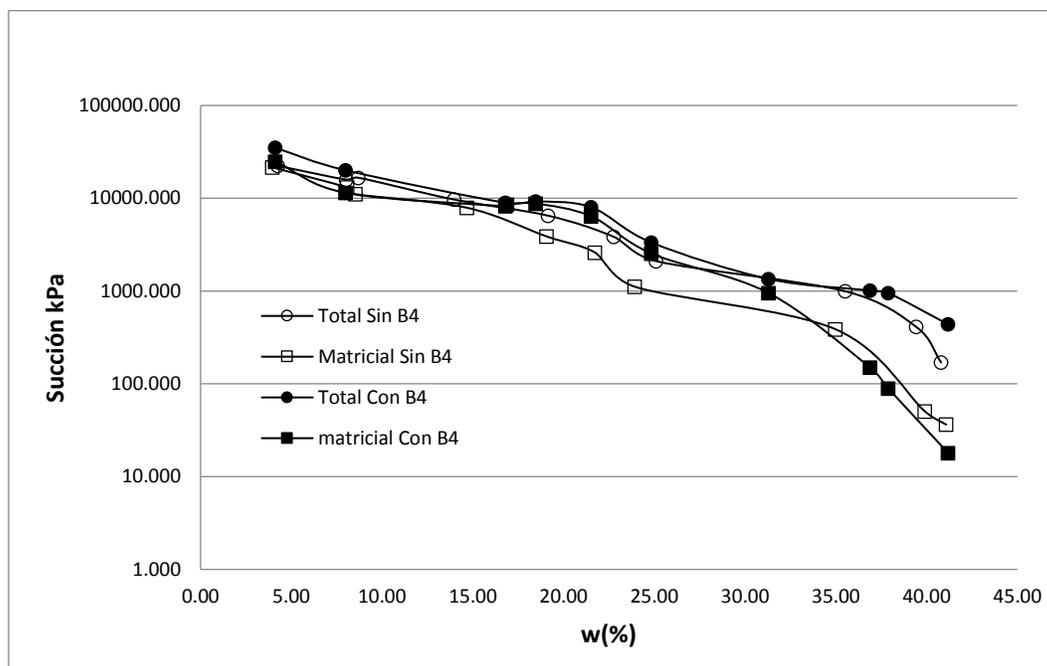


Figura 4.26 Succión Vs Humedad

Para realizar un análisis más completo y tratar explicar de forma más clara el comportamiento de la curva característica, se elaboró la gráfica de succión matricial y total versus la saturación, la cual se muestra en la Figura 4.14, donde se puede decir que el suelo con nutriente presenta una leve mejoría en el valor de la succión respecto del suelo natural, tanto en la curva de la succión total y la succión matricial, aunque en esta última es muy leve en la zona de los macroporos (para humedades mayores a 35%).

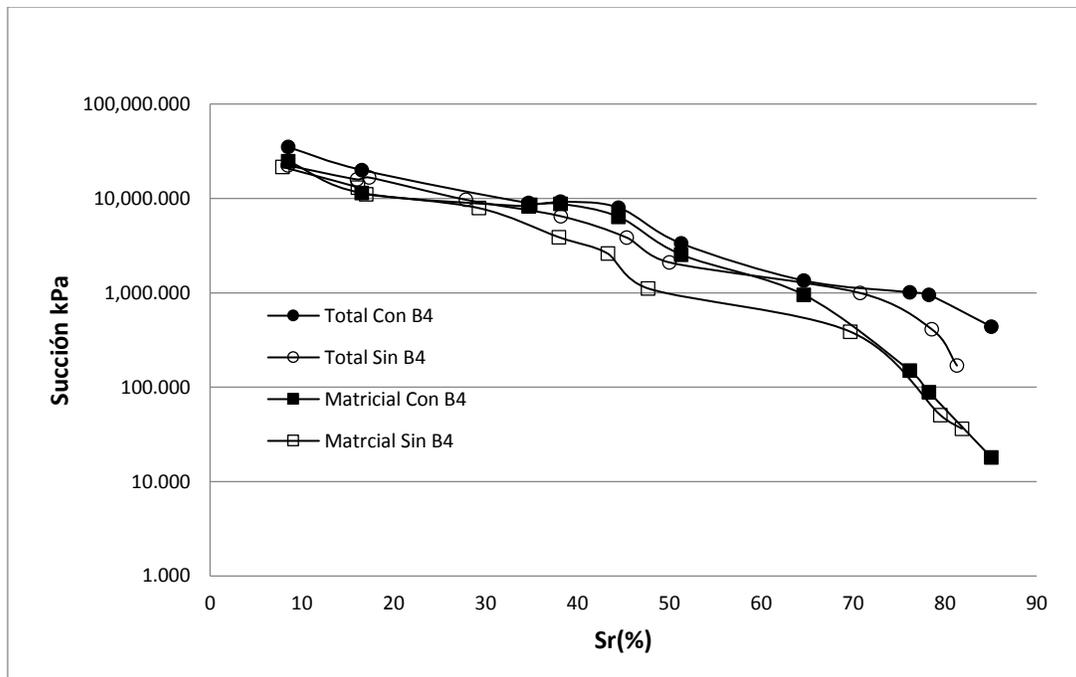


Figura 4.27 Succión Vs Saturación Sr (%)

Para facilitar aún más el estudio del comportamiento de la curva característica del suelo con y sin nutriente, se empleó la metodología propuesta Camapum de Carvalho & Leroueil (2004), denominada la Curva Característica Transformada, obtenida utilizando en uno de los ejes la succión en pF (pF es el logaritmo de succión en centímetros de una columna de agua por la relación de vacío del suelo, la succión en pF se puede calcular a partir de la succión en kPa, una unidad más utilizada en geotecnia, tomando el logaritmo (base 10) y multiplicándolo por un factor de 10, dividida por el índice de vacíos de los cuerpos de prueba (Camapum de Carvalho & Leroueil, 2004).

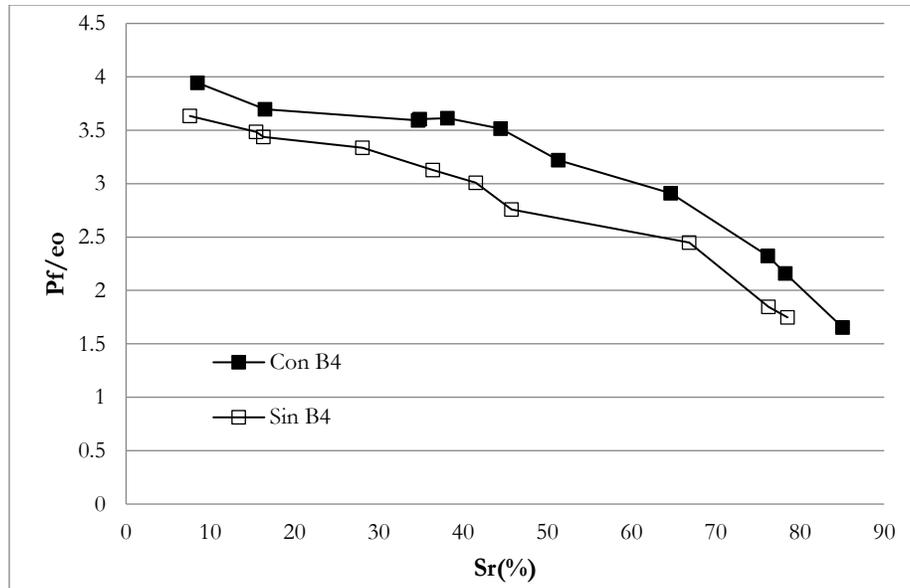


Figura 4.28 Succión Matricial pF/eo Vs Humedad.

Si bien en las gráficas anteriores no se reflejan una diferencia marcada en las succiones matriciales, al incluir el índice de vacíos como lo hace la Figura 4.15, la curva de la muestra con B4 se encuentra por encima de la curva de la muestra sin B4; indicando un menor índice de vacíos al tratar el suelo, constatando lo ya mencionado sobre la densificación generada en el suelo por la adición del nutriente.

4.2.3 Permeabilidad

Para el modelamiento de las propiedades hidráulicas del suelo en el software de estabilidad y ver su relación con la estabilidad del talud, se realizó la correlación entre la curva característica y la permeabilidad saturada, que en este caso es de $7,85E^{-05}$ cm/s para el suelo sin nutriente y de $2,46E^{-05}$ cm/s para el suelo con B4. Para determinar así la función de permeabilidad del suelo $K_w(\theta_w)_i$, la correlación se realizó por método estadístico utilizando las fórmulas descritas en (Fredlund et al., 2012), la Figura 4.16 muestra los datos de la función de permeabilidad para los dos casos, con y sin nutriente.

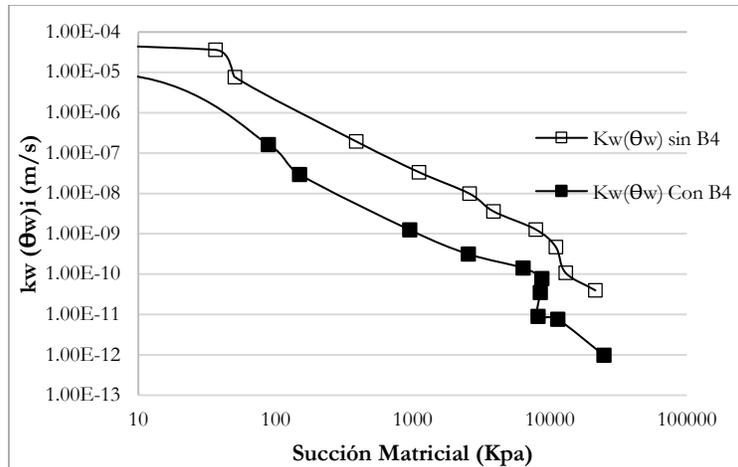


Figura 4.29 función de permeabilidad $K_w(\theta_w)_i$

De la gráfica se puede decir que el suelo con B4 presenta menor permeabilidad que el suelo sin B4, esto debido a la densificación como un todo, que genera la adición del nutriente.

4.5 Calculo de estabilidad de talud

A continuación, se presenta los resultados, obtenidos de la modelación del talud de suelo residual del cerro El Volador, en el software de estabilidad GeoStudio, Student Edition 8.15.1.11236 de 2012, con las propiedades geotécnicas descritas en las diferentes caracterizaciones analizadas atrás, en condiciones estáticas y dinámicas, que permitan ver como mejora el FS al usar el nutriente.

La Figura 4.17 muestra el diagrama de distribución de presión de poros después de ser modelado un evento de lluvia, el cual es igual tanto para el caso del suelo Con y Sin B4; las flechas azules sobre la superficie del talud muestran la forma en que se aplica la lluvia al suelo.

La Figura 4.18 muestra el resultado del análisis inicial estático en el módulo QUAKE/W donde se modelará el espectro de diseño para el sitio de estudio, este diagrama es el igual para el suelo con y sin B4. Posteriormente, este resultado permite el análisis equivalente lineal dinámico, aplicando la fuerza horizontal de sismo, para comparar el movimiento del talud.

La Figura 4.19 se ilustra el resultado del análisis lineal dinámico al aplicar el espectro de diseño al modelo.

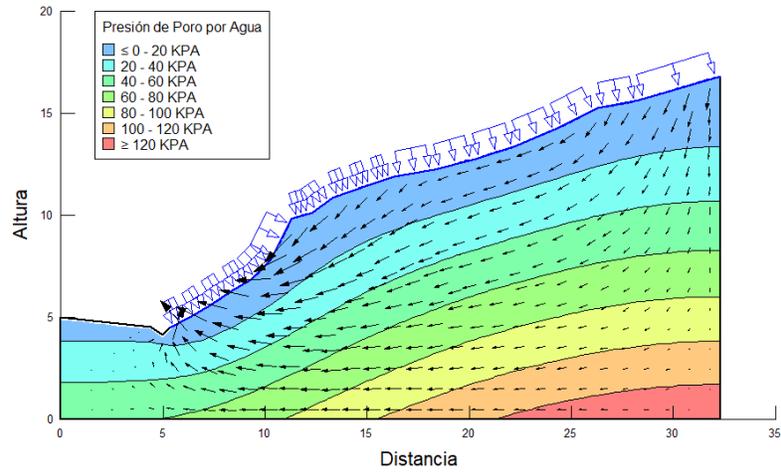


Figura 4.30 Presión de poros Sin B4

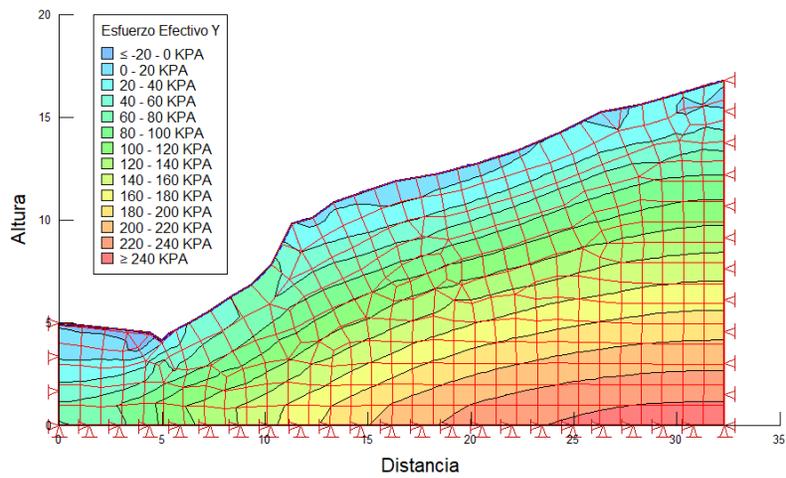


Figura 4.31 Análisis inicial estático en QUAKE/W

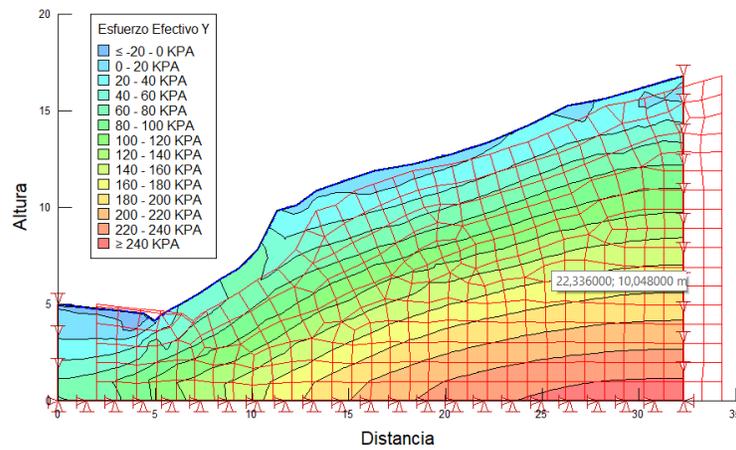


Figura 4.32 Análisis Equivalente Lineal Dinámico en QUAKE/W

A partir de las condiciones iniciales anteriores, las cuales son iguales tanto para el suelo con y sin B4; se inicia el análisis de estabilidad del talud, ingresando al modelo, la propiedades hidráulicas y mecánicas, obtenidas de la caracterización del suelo antes y después del tratamiento con el nutriente.

Las Figuras 4.20 y 4.21 presentan los resultados del análisis de estabilidad para el talud sin B4, antes y después de la aplicación de la fuerza horizontal de sismo en el modelo, en donde se puede observar el factor de seguridad mínimo determinístico y la superficie de falla circular crítica.

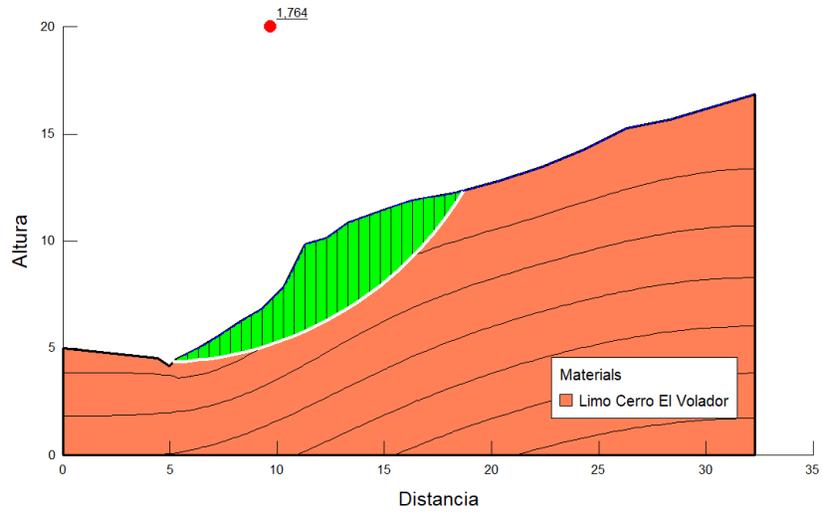


Figura 4.33 FS determinístico Sin B4 Estático

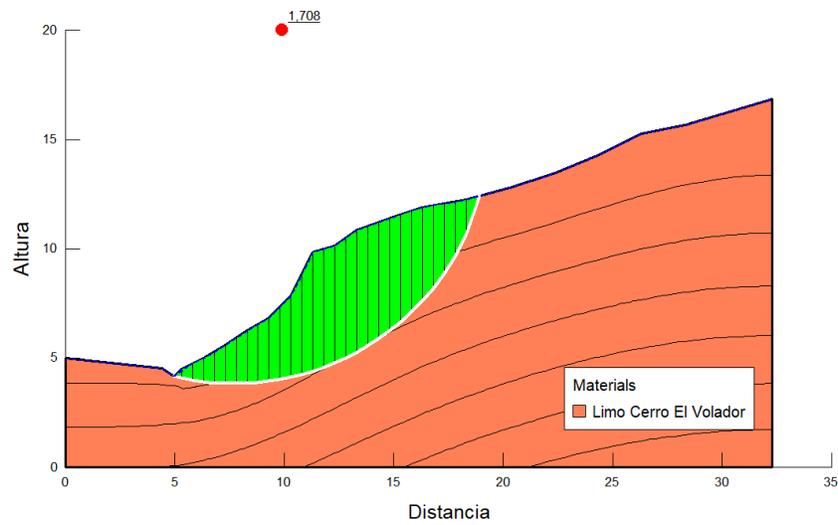


Figura 4.34 FS determinístico Sin B4 con Sismo

En las Figuras 4.22 y 4.23 se presentan los resultados del análisis de estabilidad para el talud Con B4, antes y después de la aplicación de la fuerza horizontal de sismo en el modelo, en donde se puede observar el factor de seguridad mínimo determinístico y la superficie de falla circular crítica.

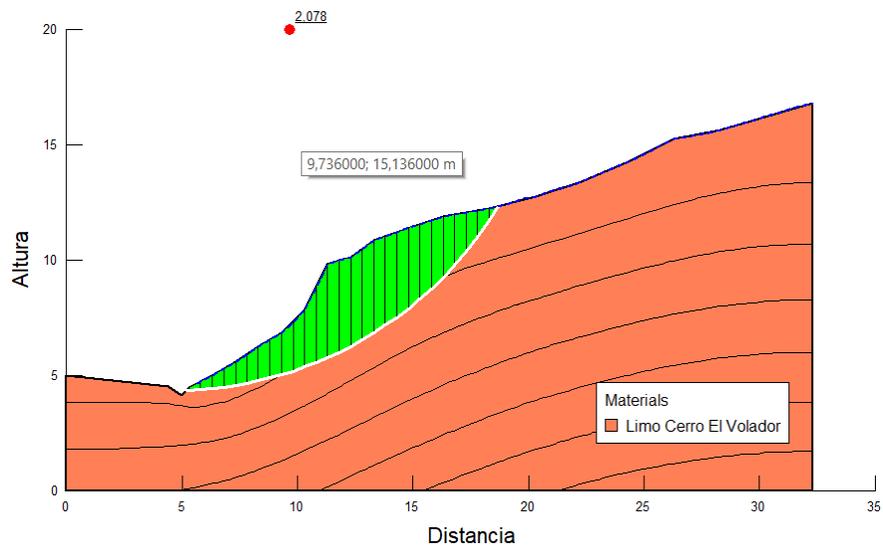


Figura 4.35 FS determinístico con B4 Estático

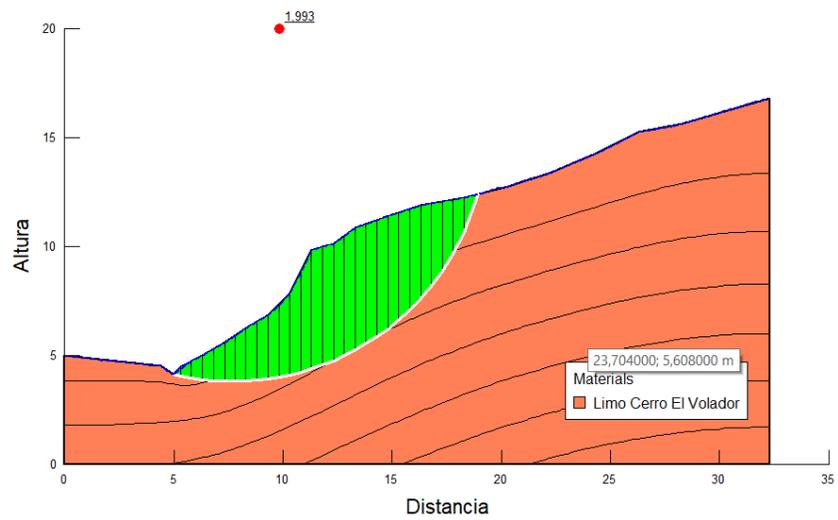


Figura 4.36 FS determinístico Con B4 con Sismo

Después de realizar el análisis de estabilidad determinístico por equilibrio límite, teniendo en cuenta el sismo de diseño para el lugar de estudio y el modelamiento de las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo y la función de lluvia acumulada; se calcularon los Factores de Seguridad probabilísticos, Sin y Con B4, trabajando con valores medios de Factores de Seguridad determinísticos de 1,700 y 1,993 respectivamente, variando cada parámetro del suelo un 10% y recalculando el factor de seguridad, con el fin de encontrar la variación total $V[Fs]$. Las Tablas 4.10 y 4.11, muestran los resultados del uso de la metodología (FOSM) para encontrar esta variación y la probabilidad de falla del suelo natural, en a las cuales se observa que el valor de $V[Fs]$ es de 0.14 correspondiente a una desviación estándar del Fs de 0.37.

Tabla 4.15 Calculo de la $V[Fs]$ del talud suelo sin B4

Parámetro	x_i	δx_i	$x_i + \delta x_i$	Fs_i	δFs_i	$(\delta Fs_i / \delta x_i)^2$	$V(x_i)$	$[\delta Fs_i / \delta x_i]^2 * v(x_i)$	% contribución
Cohesión C [kPa]	26	2.6	28.6	1.786	0.086	0.0011	108.16	0.12	86.651
Ángulo de Fricción ϕ°	35	3.5	38.5	1.835	0.135	0.0015	12.25	0.02	13.345
Peso específico γ [kN/m ³]	27.57	2.757	30.33	1.692	-0.008	0.0000	0.68	0.00	0.004
							$V[Fs]$	0.14	100.00

Tabla 4.16 Calculo de Probabilidad de Falla Talud suelo sin B4

Fs medio determinístico	1.700
Fs variando C	1.786
Fs variando ϕ	1.835
Fs variando γ	1.692
Fs Promedio Probabilístico	1.753
Desviación estándar $v(v[Fs])$	0.370
Probabilidad de Falla %	2.08

La Figura 4.24, presenta en un diagrama de barras, la influencia en porcentaje de cada variable sobre el factor de seguridad, de la cual se puede observar que tal como se mencionó anteriormente y como era de esperar, la cohesión es el parámetro más influyente en la estabilidad del talud de estudio (86.65% de influencia).

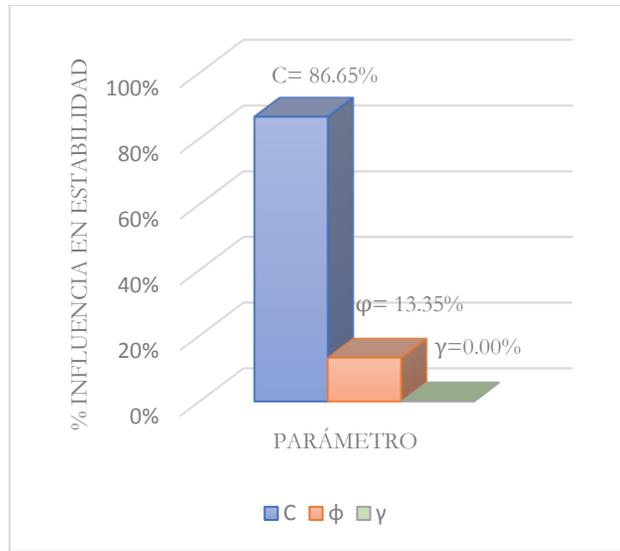


Figura 4.37 Diagrama de influencia de los parámetros en V[Fs] suelo Sin B4

La Tabla 4.12 y 4.13 muestran los correspondientes resultados del cálculo de la variación total del factor de seguridad V[Fs] para el suelo tratado con B4 para el cual V[Fs] es igual a 0.17 correspondiente a una desviación estándar del factor de seguridad de 0.41, así como la probabilidad de falla del talud con suelo tratado.

Tabla 4.17 Cálculo de la V[Fs] del talud suelo Con B4

Parámetro	xi	δ xi	xi+δ xi	Fsi	δ Fsi	(δ Fsi/δ xi)2	V(xi)	[δ Fsi/δ xi]2* v(xi)	% contribución
Cohesión C [kPa]	32	3.2	35.2	2.089	0.096	0.0009	163.84	0.15	86.58
Ángulo de Fricción φ°	38	3.8	41.8	2.144	0.151	0.0016	14.44	0.02	13.39
Peso específico γ [kN/m³]	27.76	2.776	30.54	1.968	-0.025	0.0001	0.69	0.00	0.03
							V[F]	0.17	100.00

Tabla 4.18 Cálculo de Probabilidad de Falla talud suelo con B4

Fs medio determinístico	1.993
Fs variando C	2.089
Fs variando φ	2.144
Fs variando γ	1.968
FS Promedio Probabilístico	2.049
Desviación estándar v(v[fs])	0.413
Probabilidad de Falla %	0.55

La Figura 4.25, presenta en un diagrama de barras, la influencia en porcentaje de cada variable sobre el factor de seguridad, de la cual se puede observar que tal como se mencionó anteriormente y como era de esperar, la cohesión es el parámetro más influyente en la estabilidad del talud de estudio (86.58% de influencia).

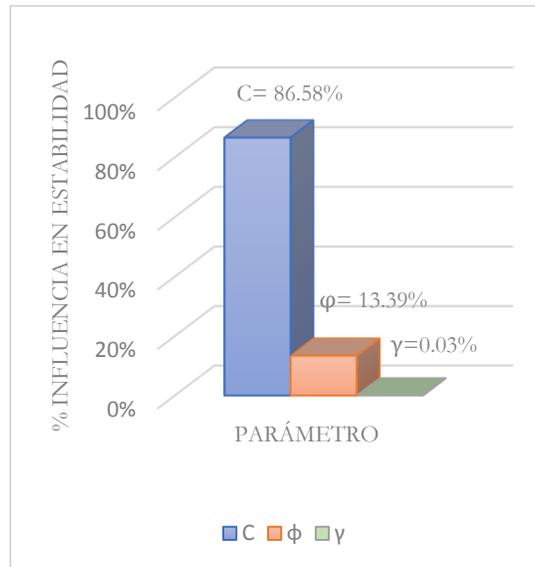


Figura 4.38 Diagrama de influencia de los parámetros en $V[F_s]$ suelo con B4

La Tabla 4.14 muestra en resumen los resultados de los factores de seguridad probabilístico para cada tipo de talud modelado, así como las probabilidades de falla resultado del análisis del método FOSM; de acuerdo con los resultados, se puede ver una mejoría en el factor de seguridad del 14% y una disminución en la probabilidad de falla (P_r) del 74%.

Tabla 4.19 Factores de seguridad y Probabilidad de Falla con y sin B4

Parámetro	Sin B4	Con B4
FS Probabilístico	1.708	1.993
Pr %	2.08	0.55

5 Conclusiones y recomendaciones

Si bien la adición del nutriente B4 no indujo la precipitación de minerales de carbonato de calcio, su incorporación tuvo un efecto de carácter químico en las partículas de suelo pasados 15 días, generando una densificación de la estructura, constatada en los resultados de granulometría, MCT, PZC, permeabilidad y succión, influenciando en la variación de los parámetros de resistencia al corte del suelo, aumentando la cohesión y la fricción en un 20% y 8% respectivamente; afectando de manera directa el Factor de Seguridad, aumentando en un 14% y disminuyendo la probabilidad de falla en un 74%, constituyéndose en una técnica que se muestra viable, y la cual con mayor profundización e investigación, permitirá un avance en el desarrollo biotecnológico del país.

Por otra parte, cabe resaltar la importancia de la caracterización de los suelos residuales tropicales con ensayos poco convencionales como la curva característica (succión total y matricial), el Δp_H , el PZC, la clasificación MCT-expedita, el análisis por DRX y MEB, la granulometría con y sin defloculante; que permiten identificar particularidades en las propiedades del suelo, diferentes a las propiedades de los suelos de clima templado, brindándole al ingeniero información adicional que puede solucionar muchos cuestionamientos que se presentan en el día a día del quehacer ingenieril.

Por último se pretende en este trabajo destacar la importancia en el uso del software de análisis de estabilidad de taludes y el estudio probabilístico empleado, ya que permite el modelamiento no solo de las propiedades mecánicas e hidráulicas convencionales; sino también incorporar aquellas no convencionales como la curva característica, la función de permeabilidad no saturada y la función de lluvia acumulada, que representan de manera más acertada la condición *in-situ* del material, obteniéndose un modelo más real del comportamiento del suelo, disminuyendo así las incertidumbres en la práctica ingenieril.

Como recomendación se sugiere que, aunque la implementación en campo de la técnica se vislumbra viable a partir de los resultados obtenidos en laboratorio; se debe profundizar en el estudio de la forma de inyección y el punto máximo de saturación del talud con el nutriente (para no generar problemas de inestabilidad en la adición) y la factibilidad económica; para poder así, implementar una metodología general de estabilización de taludes a partir de técnicas biotecnológicas en la práctica ingenieril.

De igual forma sería muy interesante para las investigaciones futuras, trabajar en la búsqueda de compuestos químicos que reduzcan los costos de la preparación del nutriente precipitador de carbonato de calcio, y así poder tornar esta técnica viable no solo ambientalmente por utilizar las bacterias nativas, si no económicamente factible al usar insumos alternativos de bajo costo.

Bibliografía

- Alcaldía de Medellín, D. A. de P. Microzonificación Sísmica del Área Urbana de Medellín (2011). Colombia.
- AMVA Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2018). Plan de Manejo Parque Natural Regional Metropolitano Cerro El Volador, Convenio de Asociación 1087 de 2016, 467.
- Appel, C., Ma, L. Q., Rhue, R. D., & Kennelley, E. (2003). Point of zero charge determination in soils and minerals via traditional methods and detection of electroacoustic mobility. *Geoderma*, 113(1–2), 77–93. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00316-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00316-6)
- Araki, M. (1997). *Aspectos relativos ás propriedades dos solos porosos colapsíveis do Distrito Federal*. Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental Universidade de Brasília.
- Arrieta, M. T. (2011). Biomineralización aplicada a La mitigación de procesos erosivos superficiales, en un suelo tropical de la ciudad de Medellín, 61. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/5472/1/1103096887.2011.pdf>
- ASTM D2216-10. Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass (2010).
- ASTM D2434-68. Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head) (2006).
- ASTM D2487-17. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) (2017).
- ASTM D3080/D3080M-11. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions (2011).
- ASTM D4221-18. Standard Test Method for Dispersive Characteristics of Clay Soil by Double Hydromete (2018).
- ASTM D4318-17e1. Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (2017).
- ASTM D4972-18. Standard Test Methods for pH of Soils (2018).
- ASTM D5298-16. Standard Test Method for Measurement of Soil Potential (Suction) Using Filter Paper (2016).
- ASTM D5550-14. Standard Test Method for Specific Gravity of Soil Solids by Gas Pycnometer (2014).
- ASTM D6913/D6913M-17. Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis (2017).
- ASTM D7928-17. Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils

- Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis (2017).
- ASTM D854-14. Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (2014).
- Botero, E. (2018). Metodologia Para Aplicação De Redes Neurais Artificiais Para Sistemas De Alerta De Escorregamentos Deflagrados Por Chuvas Em Regiões Montanhosas. *Universidade De Brasília Faculdade De Tecnologia Departamento De Engenharia Civil E Ambiental*, 98.
- Camapum de Carvalho, J., & Leroueil, S. (2004). Curva característica de sucção transformada. *Solos e Rochas*, 27(3), 231–242.
- Camapum de Carvalho, José, Bueno da Fonseca, F., dos Santos, F., Barbosa, M. C., Godim, R. M., & Moreira, W. (2015). Propriedades químicas, mineralógicas e estruturais de solos naturais e compactados. In *Solos não saturados no contexto geotécnico* (pp. 39–74). São Paulo. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Camapum de Carvalho, J., Neves Gitirana Jr, G. de F., & Leão Carvahlo, E. T. (2012). *Tópicos sobre Infiltração: Teoria y Practica aplicadas a Suelos Tropicales*. Brasília: Série Geotecnia-UnB.
- Correa M., A. M., Martens, U., Restrepo A., J. J., Ordóñez Carmona, O., & Martins Pimentel, M. (2005). Subdivisión de las Metamorfitas Básicas de los Alrededores de Medellín – Cordillera Central de Colombia, (September), 325–344.
- DeJong, J.T., Fritzes, M. B., & Nüsslein, K. (2006). Microbial induced cementation to control sand response to undrained shear. *ASCE J. Geotech. Geoenviron*, 132, 1381–1392.
- DeJong, Jason T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. *Ecological Engineering*, 36(2), 197–210. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029>
- Duchaufour, P. (1982). *Pedology Pedogenesis and Classification*. Londres.
- Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*, Wiley, New York. Wiley, New York.
- Fredlund, D. G., Rahardjo, H., & Fredlund, M. D. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Gallegos, G., Rojas, E., Leal, J., & Mora, R. (2012). Efecto de la succión en la estabilidad de un talud de arena limosa. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XIII(número 3), 271–281.
- Gómez, C. M. (2013). *Avaliação geotécnica de um perfil de solo tratado biotecnologicamente para fins de pavimentação*. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- Gomez, M. G., Graddy, C. M. R., DeJong, J. T., Nelson, D. C., & Tsesarsky, M. (2018). Stimulation of Native Microorganisms for Biocementation in Samples Recovered from Field-Scale Treatment Depths. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(1), 04017098. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001804](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001804)
- Hena Casas, J. D., & Monsalve, G. (2018). Geological inferences about the upper crustal configuration of the Medellín – Aburra Valley (Colombia) using strong motion seismic records. *Geodesy and Geodynamics*. <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.06.005>
- Houston, S. L., Perez-Garcia, N., & Houston, W. N. (2008). Shear strength and shear-induced volume change behavior of unsaturated soils from a triaxial test program. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 134(11), 1619–1632. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2008\)134:11\(1619\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:11(1619))
- Hoyos Patiño, F. (2004). *Suelos Tropicales* (First). Medellín: Hombre Nuevo Editores.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2008). Imagen Aerofotográfica No. 050010001525082008-0328C.

- Departamento de Antioquia, Municipio de Medellín. Retrieved from <http://www.bni.gov.co/portal/public/classic/Busqueda?faces-redirect=true>
- Lee, Y. N. (2003). Calcite Production by *Bacillus amyloliquefacies* CMB01. *The Journal of Microbiology*, 41, 345–348.
- Martinez, B. C., DeJong, J. T., Ginn, T. R., Montoya, B. M., Barkouki, T. H., Hunt, C., ... Major, D. (2013). Experimental Optimization of Microbial Induced Calcite Precipitation for Soil Improvement. *ASCE J. Geotech., Geoenviron.*, 587–598.
- Martínez, G., Maya, L., Rueda, D., & Sierra, G. (2003). Aplicaciones Estructurales de Bacterias en la Construcción de nuevas obras de Infraestructura- Estabilización de Suelos, 151.
- Meza, Ochoa, V. E. (2012). Unsaturated Soils, From Research To the University Lecture. *Boletín de Ciencias de La Tierra*, (31), 23–38.
- Meza Ochoa, V. E. (2019). *INFLUÊNCIA DA MINERALOGIA DO SOLO NA BIO- PRECIPITAÇÃO DE CARBONATOS COMO TÉCNICA DE VICTORIA ELENA MEZA OCHOA ORIENTADOR: HERNAN EDUARDO MARTINEZ*. Universidade de Brasília.
- Montoya Hidalgo, C. A., & Assis, A. P. (2011). Herramientas Para Análisis Por Confiabilidad En Geotecnia. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(18), 69–77.
- Nelson, D. C., Lau, H. X., Gomez, M. G., Anderson, C. M., & DeJong, J. T. (2014). Stimulating In-Situ Soil Bacteria for Bio-Cementation of Sands. *Geo-Congress*, 1674–1682. <https://doi.org/10.1061/9780784413272.164>
- Nogami, J. S., & Villibor, D. F. (1995). *Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos* (Villibor). São Paulo.
- Rebata, V. (2007). *Microbial Activity in Sediments: Effects on Soil Behavior*. Georgia Institution of Technology.
- Restrepo-Moreno, S. A., Foster, D. A., Stockli, D. F., & Parra-Sánchez, L. N. (2009). Long-term erosion and exhumation of the “Altiplano Antioqueño”, Northern Andes (Colombia) from apatite (U-Th)/He thermochronology. *Earth and Planetary Science Letters*. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.09.037>
- Santos, P. de S. (1975). *Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras. Vol 1 Fundamentos* (E. Blücher). São Paulo: Universidade de São Paulo.
- Shirakawa, M. A. Kaminishikawahara, K. K., Vanderley, M. ., Kahn, H., & Futai, M. M. (2011). Sand bioconsolidation through the precipitation of calcium carbonate by two ureolytic bacteria. *Materials Letters*, 65, 1730–1733.
- Soto, A. (2003). Introducción a los Biominerales y Biomateriales. (p. 31). Santiago de Chile.
- Valencia González, Y. (2009). Influência Da Biomineralização Nas Propriedades Físico - Mecânicas De Um Perfil De Solo Tropical Afetado Por Processos Erosivos, 208.
- Valencia González, Y., Assis, A. P., & Camapum de Carvalho, J. (2005). Estudo do Efeito da Intemperização na Estabilidade de um Talude de Solos Metamórficos Aplicando Métodos Probabilísticos (pp. 341–347). Goiânia, Goiás: II Simpósio sobre Solos Tropicais e Processos Erosivos no Centro - Oeste.
- Valencia gonzález, Y., Camapum de Carvalho, J., & Lara valencia, L. A. (2015). Influence of biomineralization on a profile of a tropical soil affected by erosive processes Influencia de la biomineralización en un perfil de suelo tropical afectado por procesos erosivos, 82(192), 221–229. <https://doi.org/10.15446/dyna.v82n192.42942>
- Van Paassen, L., Harkes, M., Van Zwieten, A., Van der Zon, W., Van de Star, W., & Van Loosdrecht, M. (2009). Scale up of BioGrout: a biological ground reinforcement method. *Proc. of the 17th International*

Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2328 M. Hamza et Al, 328–2333.

Venda Oliveira, P. J., da Costa, M. S., Costa, J. N. P., & Fernanda Nobre, M. (2015). Comparison of the ability of two bacteria to improve the behavior of sandy soil. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(1), 1–5. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001138](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001138)

Whiffin, V. S. (2004). *Microbial CaCO₃ precipitation for the production of biocement*. Perth: Murdoch University, Western Australia.