

**CONTROL DE LA EROSIÓN DE TALUDES MEDIANTE EL USO DE VETIVER Y
MICORRIZAS ARBUSCULARES, ZONA DE SOCEAGRO EN EL MUNICIPIO DE
VILLAVICENCIO – META**



Por:

**Salomón Andrés Sánchez Restrepo
Sergio Oviedo Solano**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
VILLAVICENCIO
2019**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
CONTROL DE LA EROSIÓN DE TALUDES MEDIANTE EL USO DE VETIVER Y
MICORRIZAS ARBUSCULARES, ZONA DE SOCEAGRO EN EL MUNICIPIO DE
VILLAVICENCIO – META**

Por:
**Salomón Andrés Sánchez Restrepo
Sergio Oviedo Solano**

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional de
ingeniero civil

Aprobado por:
Ing. Jessica María Ramírez Cuello, M.Eng
Director

Ing. Paulo José Aragón Otero
Codirector



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
VILLAVICENCIO
2019**

Nota de aceptación

Ing. Jhon Jairo Gil Peláez, Ph.D
Director Trabajo de Grado

Ing. Jessica María Ramírez Cuello, M.Eng
Director Trabajo de Grado

Ing. German Ernesto Chicangana Montón, M.Sc
Jurado

Villavicencio, 15 de Mayo del 2019

DEDICATORIA

Dedicamos esta tesis a Dios, a nuestras familias y a los Ingenieros, Geólogos y demás profesionales que se interesaron y sintieron identificados con dar un aporte o apoyar con su motivación la continuación de esta investigación. Gracias a cada uno por su tiempo, dedicación y fe. Todo se hizo con el ánimo de hacer una contribución a la ingeniería, la ciencia y a la vida.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer al Ingeniero Paulo José Aragón Otero, por su confianza desde el inicio del semillero, por su tiempo y dedicación. Incluso después de no pertenecer a la universidad continuó apoyándonos para sacar adelante este importante proyecto. Al grupo de investigación GEBIUT de la Universidad del Tolima por su aporte en el montaje y seguimiento del cultivo del pasto Vetiver inoculado con Micorrizas. A la Ingeniera Jessica María Ramírez Cuello, por tomar el semillero de investigación y guiarnos hasta conseguir el objetivo. A las laboratoristas de la USTA Villavicencio, especialmente a la Ingeniera Karen Olaya quien siempre brindó su apoyo y disponibilidad para realizar los ensayos de laboratorio necesarios. Al señor decano de la facultad de ingeniería civil de la Universidad Cooperativa de Colombia, por su apoyo oportuno facilitando los laboratorios de esa Universidad. Por último, a cada una de las personas que con su aporte y ayuda hicieron que este proyecto se llevara a cabo.

RESUMEN

Este trabajo de investigación, evalúa una solución eficaz, económica y natural a la problemática de erosión de taludes, mediante el cubrimiento total del área vulnerable, con un esquema matricial de plantas de la especie Vetiver, colonizadas con hongos formadores de Micorrizas Arbusculares. Esto es un proceso biológico, producto de la relación simbiótica entre ambos organismos, que obtiene una alteración positiva de las características biológicas y propiedades físicas de la planta, entre lo que se destaca, un comprobado y considerable aumento en la longitud radicular de la misma, obteniendo así mejoras en cuanto a la estabilización del talud y control de la erosión, gracias al aumento de las propiedades mecánicas del suelo por acción de la raíz potencializada por las Micorrizas.

Por lo anterior, se evaluarán los efectos que produce la raíz de la planta en un suelo inclinado y cómo, desde la perspectiva de la ingeniería civil, se puede aplicar las plantas Vetiver alteradas por las Micorrizas Arbusculares (MA), para mitigar o controlar la erosión y estabilizar el talud. Esto con el fin de intentar tratar sólo el problema con la naturaleza misma, evitando así el uso de técnicas convencionales que incluye el uso de geo-membranas o geo-sintéticos, o coberturas con concreto en exceso u otro material utilizado actualmente y perjudicial para el medio ambiente.

Se ha escogido una zona bastante vulnerable, que se conoce como Piedemonte llanero, en el departamento del Meta, delimitado en la universidad Santo Tomás sede Loma Linda, como zona de estudio. Dadas las condiciones climáticas, la inestabilidad de los suelos y la considerable intervención y alteración por obras civiles, potencializando fenómenos de remoción en masa y desastres naturales.

Palabras Clave – Erosión, Micorrizas, Taludes, Vetiver.

ABSTRACT

This research work evaluates a possible effective, economic and natural solution to the problem of erosion control of slopes. Specifically, through the total coverage of the vulnerable area, with a matrix scheme of plants of the Vetiver species, colonized with molds forming Arbuscular Mycorrhizae. This is a biological process, which is a product of the symbiotic relationship between both organisms, and contained a positive alteration of the biological characteristics and physical properties of the plant, between which it stands out, a verified and considerable increase of its root length. In addition to improvements in the structure of soil, thus obtaining improvements in terms of stabilization of the slope and control of erosion in it, thanks to the increase in the mechanical properties of the soil by root action potentiated by Mycorrhizae.

Moreover, we will investigate the effects this improvidence in the plant root produce on sloping ground and how, from a civil engineering's perspective, you can apply the Vetiver plants altered by Arbuscular Mycorrhizae (MA), to mitigate or control erosion and stabilize the slopes, treating only the problem with nature itself. Hereby we try to avoid the use of conventional techniques that include the use of geo-membranes or geo-synthetics, or coverage with excess concrete, and finally, materials that are currently used that are harmful to the environment.

A very vulnerable area has been chosen, known as the Piedemonte in the department of Meta, delimiting the Santo Tomas campus in the Loma Linda campus, as a study area. Given the climatic conditions, the instability of the soils and the important intervention and alteration by civil works is a fact that enhances phenomena of mass removal and natural disasters.

Key Word - *Erosion, Mycorrhizae, Slopes, Vetiver.*

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	13
1.1	MOTIVACIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	13
1.2	FINALIDAD.....	14
1.2.1	OBJETIVO GENERAL.....	14
1.2.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	14
1.3	APORTES DEL TRABAJO.....	14
1.4	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	15
2	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	16
2.1	MARCO TEÓRICO.....	16
2.1.1	EROSIÓN DEL SUELO.....	16
2.1.2	CRITERIO DE FALLAS DE TALUD.....	17
2.1.3	PARÁMETROS DE EVALUACIÓN DEL SUELO.....	18
2.1.4	ANÁLISIS DE ESTABILIDAD CONSIDERANDO LAS RAÍCES.....	19
2.1.5	MICORRIZAS.....	20
2.1.6	PASTO VETIVER.....	21
2.2	MARCO LEGAL.....	24
2.3	ESTADO DEL ARTE.....	27
2.3.1	HONGO FORMADOR DE MICORRIZAS ARBUSCULARES.....	27
2.3.2	PASTO VETIVER.....	28
2.4.	CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO.....	29
3	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	30
3.1	DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS.....	30
3.2	RESULTADOS DE EJECUCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS.....	31
3.2.1	DEFINICIÓN DEL SITIO DE APLICACIÓN.....	31
3.2.2	ESTUDIOS INICIALES.....	34
3.2.3	APIQUE EN SUELO.....	36
3.2.4	ANÁLISIS FÍSICO - QUÍMICO DEL SUELO, UNIVERSIDAD DEL TOLIMA 38	
3.2.5	SONDEO DEL SUELO.....	40
3.2.6	PREPARACIÓN DEL TERRENO.....	43
3.2.7	TOPOGRAFÍA.....	44
3.2.8	SIEMBRA DE VETIVER E INOCULACIÓN CON MA.....	47
3.2.9	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	51
3.2.10	ANÁLISIS DE LAS PLÁNTULAS EN CAMPO.....	65
3.2.11	FAVORECIMIENTO CONTRA LA EROSIÓN.....	69
3.3	CONCLUSIÓN DEL CAPITULO.....	71
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	73
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
5.1	CONCLUSIONES.....	78
5.2	RECOMENDACIONES.....	79
6	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Envolvente de falla y círculo de Mohr. Fuente: Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales (1998)	17
Figura 2-2. Detalle de la caja para ensayo de corte directo. Fuente: Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales (1998)	17
Figura 2-3. Raíces en el corte directo. Fuente: Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con Vetiver (2017)	18
Figura 2-4 Resistencia al corte de la raíz. Fuente. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales (1998).....	19
Figura 2-5 Comparación de tres tipos de densidades de Vetiver en West Java Indonesia. Fuente: Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con Vetiver (2017).....	22
Figura 3-1 Zona posible de aplicación de la investigación en Buenavista. Fuente: Autor	32
Figura 3-2 Posible zona de aplicación sector vía antigua Villavicencio - Restrepo. Fuente: Autor	33
Figura 3-3 Elección de la superficie de aplicación. Fuente: Autor	34
Figura 3-4. Mapa precipitación media total anual de Colombia. Fuente: IDEAM, (2018)	35
Figura 3-5. Apiques y toma de muestras. Fuente: Autor	36
Figura 3-6. Estratos del suelo. Fuente: Autor	37
Figura 3-7. Efecto de la raíz en la estructura del suelo. Fuente: Autor	38
Figura 3-8. Asesoría en laboratorio de Micorrizas, U. Tolima. Fuente: Autor.....	39
Figura 3-9. Muestras de plantas alteradas con Micorrizas Arbusculares. Fuente: Autor	40
Figura 3-10. Ejecución del sondeo y toma de muestras. Fuente: Autor.....	42
Figura 3-11. Limpieza y descapote del área de 100 m2. Fuente: Autor.....	44
Figura 3-12. Materiales utilizados para el levantamiento topográfico. Fuente: Autor	44
Figura 3-13. Estación topográfica y cadenero con prisma en el levantamiento. Fuente: Autor	45
Figura 3-14. Modelación en CivilCAD, puntos topográficos del talud en estudio. Fuente: Autor	46
Figura 3-15. Modelación en CivilCAD, puntos topográficos del talud en estudio. Fuente: Autor	47
Figura 3-16. Adecuación de surcos para siembra. Fuente: Autor	48
Figura 3-17. Siembra de las plántulas de Vetiver. Fuente: Autor.....	49
Figura 3-18. Surcos después de la siembra. Fuente: Autor.....	50
Figura 3-19. Estado actual del talud con Vetiver y Micorrizas 4 meses después. Fuente: Autor	51
Figura 3-20. Lavado de los finos. Fuente: Autor.....	52
Figura 3-21. Curva Granulométrica. Fuente: Autor.....	54
Figura 3-22. Preparación y ensayo de límite líquido. Fuente: Autor	55
Figura 3-23. Realización del ensayo de límite plástico. Fuente: Autor.....	56

Figura 3-24. Modelo de regresión para límite líquido. Fuente: Autor	58
Figura 3-25. Ubicación del suelo dentro de la carta de plasticidad de Casagrande. Fuente: Autor	60
Figura 3-26. Equipo de corte directo, facilitado por la Universidad Cooperativa de Colombia. Fuente: Autor	61
Figura 3-27. Línea de tendencia que describe la envolvente de falla, con Micorrizas. Fuente: Autor	62
Figura 3-28. Línea de tendencia que describe la envolvente de falla, sin Micorrizas. Fuente: Autor	63
Figura 3-29. Curva de deformación contra esfuerzo cortante, con Micorrizas. Fuente: Autor	64
Figura 3-30. Curva de deformación contra esfuerzo cortante sin Micorrizas. Fuente: Autor	64
Figura 3-31. Preparación de muestra y resultado del corte directo. Fuente: Autor	65
Figura 3-32. Comparación de la afectación de la Micorriza sobre el vetiver a los dos meses. Fuente: Autor	65
Figura 3-33. Comparación de la afectación de la Micorriza sobre el vetiver a los tres meses. Fuente: Autor	66
Figura 3-34. Raíz de Vetiver en presencia de Micorrizas, cuatro meses después. Fuente: Autor	67
Figura 3-35. Muestra de la densidad de la raíz del Vetiver con Micorrizas. Fuente: Autor	68
Figura 3-36. Raíz de Vetiver sin presencia de Micorrizas, cuatro meses después. Fuente: Autor	69
Figura 3-37. Raíces del pasto vetiver, a la izquierda con Micorrizas, a la derecha sin Micorrizas. Fuente: Autor.....	69
Figura 3-38. Parcelas de Vetiver en diferentes condiciones. Fuente: Autor.....	70
Figura 3-39. Amarre del Vetiver con el suelo superficial. Fuente: Autor	71

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Esquema de marco normativo.....	24
Tabla 3-1. Datos generales del procedimiento a ejecutar.....	41
Tabla 3-2. Descripción del sondeo #1	41
Tabla 3-3. Descripción del sondeo #2	41
Tabla 3-4. Resultados sondeo #1.....	43
Tabla 3-5. Resultados sondeo #2.....	43
Tabla 3-6. Lista de tamices con su abertura.....	51
Tabla 3-7. Datos iniciales del tamizado.	52
Tabla 3-8. Resultado del ensayo granulométrico	53
Tabla 3-9. Resultados limite líquido	57
Tabla 3-10. Resultados ensayo límite plástico.	59
Tabla 3-11. Resumen de límites de Atterberg.	59
Tabla 3-12. Resumen de resultados de corte directo, Vetiver con Micorrizas.	61
Tabla 3-13. Resumen de resultados de corte directo, Vetiver sin Micorrizas.....	62
Tabla 4-1. Comparación de ángulos de fricción	73
Tabla 4-2. Muestras de cada caso a analizar.	74
Tabla 4-3. Conteo de las hojas del Vetiver.....	74
Tabla 4-4. Longitud radicular del Vetiver.	75
Tabla 4-5. Caracterización de raíces secundarias del Vetiver.	75
Tabla 4-6. Numero de tallos (macollamiento) del Vetiver.	76

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 2-1 Factor de seguridad. Fuente: [4]	18
Ecuación 2-2 Resistencia al corte. Fuente: [4]	18
Ecuación 3-1. Índice de Plasticidad.....	56
Ecuación 3-2. Contenido de humedad	57
Ecuación 3-3. Peso del agua	57
Ecuación 3-4. Peso del suelo seco.	57

1 INTRODUCCIÓN

La estabilización y el control de la erosión en suelos, es un problema constante, por este motivo es necesario encontrar alternativas que de manera natural, aborden los problemas de estabilización dejando de utilizar métodos que son igual de eficientes pero que tienen impactos negativos a largo plazo. Además no incentivan el uso de elementos amigables con el ambiente que en la actualidad es una responsabilidad dentro de los compromisos de la aplicación del conocimiento de la ingeniería civil. [1]

La zona de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Villavicencio, Meta, sector de Soceagro en la Universidad Santo Tomás Villavicencio campus Loma Linda, que presenta formaciones montañosas donde se han producido asentamientos humanos entorno al macizo, provocando situaciones como la tala de árboles y el retiro de la capa vegetal. Estos son unos de los principales factores de aumento de la erosión, que potencian los fenómenos de remoción en masa y los desastres naturales.

Las condiciones climáticas y los tipos de suelo presentes en esta región proporcionan condiciones ideales para eventos de remoción en masa o deslizamientos de tierra. Los procesos de remoción en masa están determinados por varios factores, primero, por las condiciones ambientales de lluvia intensa en ocasiones extremas, segundo, por los agentes antrópicos que afectan directamente las condiciones de la ladera, tercero y último, por el crecimiento sub urbano insostenible en áreas no aptas.

El trabajo de investigación propone determinar si la utilización de Micorrizas Arbusculares tiene algún efecto en la planta de pasto Vetiver y por ende una participación mayor en la estabilización del talud en el sitio de aplicación. Con el propósito de emitir un enunciado teórico válido y verificable, se ha establecido la metodología incluyendo pruebas de laboratorio y de campo necesarias, a fin de identificar teóricamente y experimentalmente la veracidad de los planteamientos.

1.1 MOTIVACIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El punto de partida del estudio son los fenómenos de remoción en masa ocasionados por procesos erosivos, tomando como caso de estudio, la erosión de taludes ocasionada por factores externos como, las precipitaciones de gran intensidad y factores internos del suelo, incluyendo las características mecánicas del mismo. Esto puede generar afectaciones considerables a obras adyacentes como el caso de vías, población en el área, secciones transversales artificiales de ríos o represas y taludes que delimitan la zona de excavación en la realización de edificaciones.

En este sentido, la población afectada no solo incluye los habitantes del sector susceptible, sino que en el caso de una vía, las consecuencias pueden ser mayores, llegando a afectar el normal funcionamiento de la libre movilidad vehicular y por ende la libre realización de las actividades económicas en poblaciones vecinas, municipios e incluso departamentos. Por otro lado el ambiente también se ve afectado por la presencia de agentes químicos presentes en los agregados de obras convencionales, contaminando tanto en su fabricación como en su utilización, creando un impacto negativo, en el ecosistema y el ambiente, contrario al uso de técnicas naturales.

Por lo sustentado anteriormente, los procesos de remoción en masa causados por la erosión en estas obras complementarias, aunque son impredecibles, pueden ser tratados con las precauciones máximas a fin de mitigar al máximo sus efectos. Por lo que el proyecto busca brindar una solución eficaz, ecológica, económica y autosustentable.

1.2 FINALIDAD

1.2.1 Objetivo General

Evaluar la eficiencia del pasto Vetiver colonizado con Micorrizas Arbusculares para el control de la erosión de taludes en una unidad experimental del Piedemonte llanero.

1.2.2 Objetivo Específicos

1. Identificar un área de estudio que represente las condiciones geomorfológicas del Piedemonte llanero.
2. Detallar condiciones geológicas y climatológicas de la zona en estudio.
3. Evaluar las características físicas y mecánicas del suelo, mediante ensayos de laboratorio, antes y después de implementar el cultivo de Vetiver Micorrizas.
4. Establecer como unidades de estudio, parcelas de Vetiver con población y sin población de Micorrizas.
5. Estimar el impacto de la inoculación del hongo formador de Micorriza Arbuscular en el pasto Vetiver.
6. Analizar por medio de los resultados, el potencial de la técnica implementada a nivel técnico, ambiental y social.

1.3 APORTES DEL TRABAJO

Comprobándose la eficacia de la técnica para estabilizar taludes, con pasto Vetiver y Micorrizas, se estaría avanzando en el estado de arte local que respecta a la geotecnia. Específicamente en el tema de control de erosión y fenómenos de remoción en masa., lo cual sería de gran relevancia e interés, dado que desde que existe la ingeniería, el hombre ha tratado con dificultad, que sus obras en suelos inclinados e inestables, no colapsen durante su periodo de servicio.

La implementación de nuevos conocimientos en la ingeniería civil a través de elementos biológicos, podría solucionar problemas locales extrapolables a otras regiones en cuanto a la erosión de taludes. Llevando a disminuir el impacto ambiental de las obras civiles en procesos de estabilización de suelos. Ya que lo que se pretende con este proyecto es explorar la implementación de un cultivo que actúe como una herramienta eficaz, amigable con el ambiente, autosustentable y a un bajo costo en el control de la erosión de taludes.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El presente documento es el informe final que evidencia con teorías referenciadas y ensayos propios, los resultados obtenidos, luego de poner en práctica la metodología planteada, para al final realizar un análisis y exponer el criterio propio sobre la validez de la investigación.

En este sentido, el documento se organiza en cuatro capítulos fundamentales. El primer capítulo, sobre el planteamiento y los alcances del proyecto. El segundo capítulo, sobre los referentes teóricos utilizados como insumo para enfocar la investigación. El tercer capítulo sobre la metodología y el proceso a seguir en su desarrollo. El cuarto y último capítulo, sobre los análisis de resultados finales donde se enuncia el producto final de la tesis.

2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 Erosión del suelo

La erosión del suelo inclinado es el problema fundamental a mitigar en la investigación, bajo la acción de la dupla “Vetiver y Micorrizas”. La erosión, es el proceso por el cual el suelo es vulnerado y transportado de un lugar a otro por efecto de fuerzas externas como viento, agua, cambios fuertes de temperatura o actividades humanas como construcción y agricultura. [1]. Para que se presente erosión, también entran en juego las no menos importantes condiciones internas del mismo suelo, las cuales dependen a su vez de sus características físicas, composición química y esfuerzos mecánicos.

Se tiene evidencia clara de que mientras más fuertes sean las lluvias y más inclinada sea la pendiente del suelo, mayor y más rápida será la erosión hídrica. [1]. Ahora, teniendo en cuenta que, en el Piedemonte llanero, específicamente en la ciudad de Villavicencio, tanto la cantidad como la intensidad de la precipitación, según datos proporcionados por el DANE, para el 2018, son de las mayores a nivel del país, contando con cifras de entre 3000 y 7000 milímetros por año. Además, contando con una media cercana a los 4000 milímetros en el último año lo que convierte la zona en estudio, ideal por cuestiones de vulnerabilidad. [2]

El ente específico sobre el cual se analizará la erosión, son los taludes. Los cuales son superficies de suelo inclinado con respecto a la horizontal, donde, de acuerdo con su formación geológica y para cuestiones de análisis, se aplicarán los conceptos de mecánica de suelos en la investigación, pues el suelo, es el material que conforma el talud, por lo menos en su superficie, donde a su vez quedará ubicada la barrera natural de Vetiver, y donde hay más susceptibilidad de erosión [3].

Cuando un talud se produce de forma natural, sin ningún tipo de alteración humana, se denomina ladera natural o simplemente ladera. Por el contrario, cuando el talud ha sido elaborado por el hombre, como parte de una obra de ingeniería, se denomina talud artificial o corte, según si hace parte de un terraplén o un desmonte de terreno natural, respectivamente. [3]

La investigación busca si es posible mitigar la erosión en un talud, aportando al concepto de estabilidad del mismo, lo cual implica su seguridad contra la falla o el movimiento de tierra. [3] Se resalta que dicha estabilidad depende de ciertos factores tales como la resistencia del material que los compone, y los empujes o esfuerzos a que este sometido.

2.1.2 Criterio de Fallas de Talud

Para determinar el valor de la influencia de las raíces de Vetiver con Micorrizas al potenciar la resistencia al esfuerzo cortante, se siguió el criterio de falla indicado por Mohr-Coulomb en 1776, el cual establece que han de realizarse ensayos de corte directo, en la zona de influencia de la planta y ejecutar la prueba a diferentes niveles de esfuerzo normal, posteriormente se realizan las curvas de esfuerzo normal contra esfuerzo cortante calculado y se traza una línea recta que mejor se ajuste a los valores máximos de esfuerzo cortante obtenidos. Esta recta describiría la envolvente de falla, su inclinación es el ángulo de fricción interna y el intercepto con el eje de las ordenadas, la cohesión del material. [5]

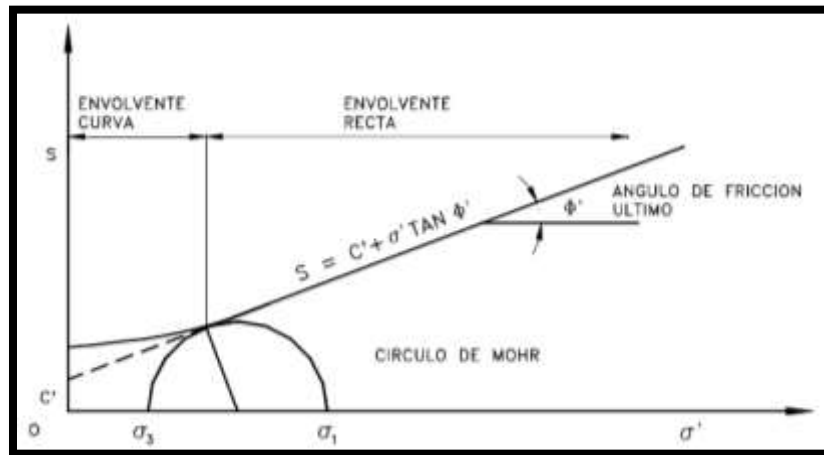


Figura 2-1. Envolvente de falla y círculo de Mohr. Fuente: Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales (1998)

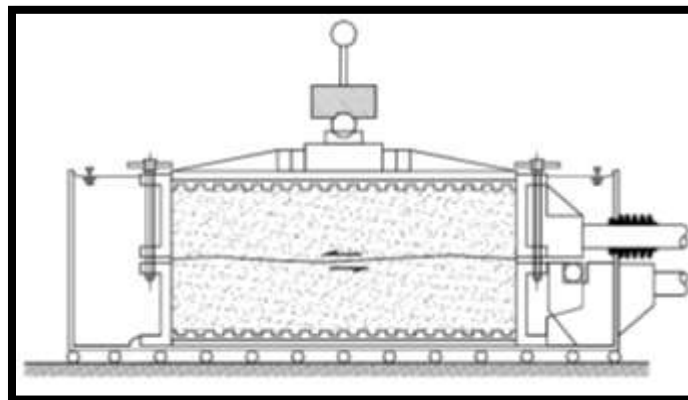


Figura 2-2. Detalle de la caja para ensayo de corte directo. Fuente: Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales (1998)

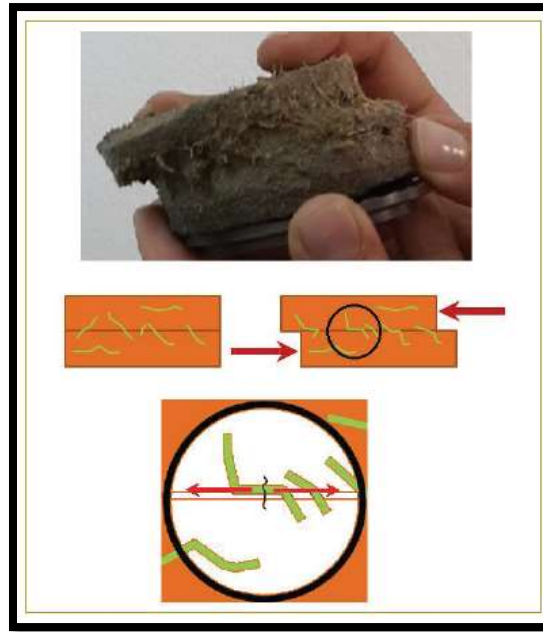


Figura 2-3. Raíces en el corte directo. Fuente: Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con Vetiver (2017)

2.1.3 Parámetros de evaluación del suelo

Según Bishop (1955), una vez entendida la importancia de evitar a toda costa la falla en un talud, se recurre a un término utilizado con frecuencia en el diseño y conservación de los mismos; el factor de seguridad (FS), el cual se obtiene numéricamente luego de dividir la resistencia al corte disponible y promedio del suelo (T_f), entre la resistencia al corte, requerida para mantener el equilibrio T_d , [4].

$$FS_s = \frac{\tau_f}{\tau_d}$$

Ecuación 2-1 Factor de seguridad. Fuente: [4]

Donde,

FS: Factor de seguridad con respecto a la resistencia.

T_f : Resistencia cortante disponible del suelo.

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

Así:

$$\tau_f = c + \sigma' \times \tan \phi$$

Ecuación 2-2 Resistencia al corte. Fuente: [4]

Donde,

c: Cohesión.

ϕ : Ángulo de fricción.

σ' : Esfuerzo normal efectivo sobre la superficie potencial de falla.

Siendo esta resistencia al corte disponible del suelo (T_f), una variable determinante en el conocimiento de la estabilidad de un talud, permite a nivel teórico - práctico, evaluar si las condiciones de un suelo con respecto a su resistencia al cortante cambian o se mantienen, dada alguna alteración en el mismo, como se propone en la presente investigación con la técnica en estudio de Vetiver micorrizado.

Se hace evidente que un valor de FS cercano a 1,0 no es aceptable, puesto que el talud estaría en inicio de proceso de falla. Por en cuanto, se recomienda un valor mayor, cercano a 1,4. Ahora, se puede decir que, dada la relación directamente proporcional de T_f y FS, es posible afirmar que un aumento demostrado en el T_f , es un parámetro válido y efectivo, para evaluar una técnica de estabilización y mejora, de las propiedades mecánicas de un talud. [4]

2.1.4 Análisis de estabilidad considerando las raíces

Tomando como referentes otras investigaciones realizadas en cuanto a estabilización de suelos con raíces de plantas, se tiene, por ejemplo, evidencias que para fallas a poca profundidad para dos casos específicos en el Japón, el factor de seguridad de acuerdo al modelo de análisis aumentó de 10 % a 13.5 %, para niveles altos de densidad de vegetación.[6]

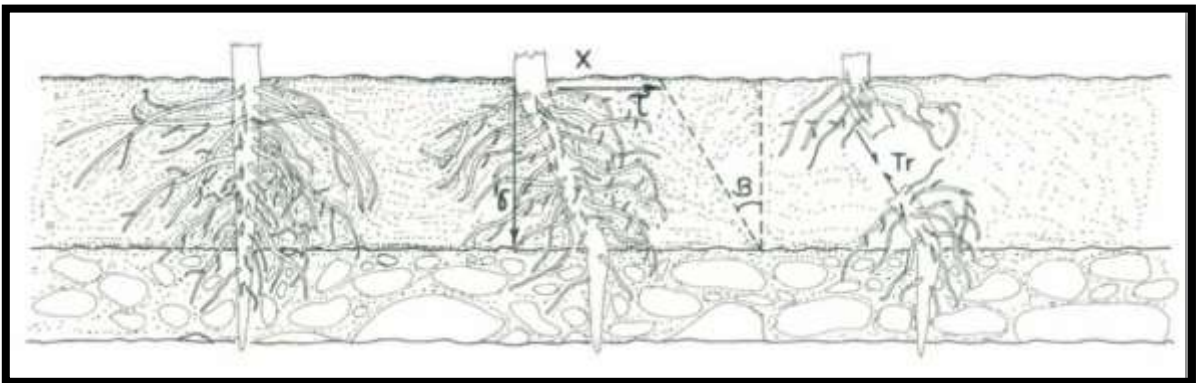


Figura 2-4 Resistencia al corte de la raíz. Fuente. Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales (1998).

Otro caso existente es en Hong Kong, donde se reportó un aumento del 33% en el factor de seguridad para un talud con árboles de aproximadamente diez metros de altura y tres metros de profundidad de las raíces, contando con una profundización de la superficie crítica de falla de 1.0 a 2.5 metros. [6]

En ese sentido es claro que el factor de seguridad aumenta, en la medida en que el suelo cuenta con vegetación. Ahora bien, entre más profundas y fuertes las raíces, mayor la influencia sobre la estabilización del talud y control sobre el plano de falla. Por lo que, para planos de falla superiores a cinco metros, se sugiere que las raíces pierden eficiencia considerando que pocas alcanzan esa longitud. [6]

2.1.5 Micorrizas

El termino Micorriza, es como se conoce a la simbiosis mutualista. Es decir, la asociación entre especies en la cual cada una, se beneficia a su manera de la otra. En este caso, se da entre las raíces de las plantas y ciertos hongos del suelo. [9]. Hongo formador de Micorrizas arbusculares a los que por practicidad se denominara como (HFMA).

Es conocido que el accionar del hongo, inicia con una mejora en las condiciones físico-químicas y biológicas del suelo. Posteriormente coloniza la corteza de la raíz y desarrolla una extensión en la misma, denominada “micelio” o “hifas”.

Funciones de las Micorrizas según [9]:

- Incrementa el volumen de la raíz y hace más eficiente la absorción y transporte de agua y nutrientes.
- Aumenta la productividad vegetal.
- Participa en la recuperación de suelos degradados.
- Permite mayor resistencia de las plantas a la sequía, altas temperaturas, toxinas y acidez del suelo. Los HFMA presentan una gran habilidad para incidir en la estabilidad de ecosistemas donde las condiciones son extremas. [1]

La microbiología en Colombia tuvo que reaccionar ante las constantes demandas de una sociedad cambiante preocupada por el uso de materiales químicos y sintéticos que mostraban resultados pero que a lo largo de la historia se ha evidenciado su lado negativo más agresivo con las plantas y el ambiente, por eso las investigaciones apuntan a un análisis de los sistemas que se conocían antes, pero que se dejaron, por la velocidad en la investigación química.

Los desarrollos de la bioingeniería y biotecnología se quieren aplicar a problemas más específicos y lugares determinantes para la economía de la región del presente estudio, donde la potencialización del uso de la planta que bajo las condiciones de la zona brindarían soluciones eficientes.

El uso de Micorrizas Arbusculares también provee la estrategia necesaria para poder dar un ámbito ecológico a la aplicación de esta técnica como método mitigación de la erosión con monocultivo, dándole el concepto de sustentabilidad para conservar propiedades del suelo y su capacidad productiva, usando la menor cantidad de energía y recursos económicos posible, incentivando el reciclaje de materia y nutrientes por parte de las plantas. Esto se alcanza a través de la implementación de las Micorrizas. [8]

Por dar algunos ejemplos, en Colombia está el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), que inició trabajos de investigación con Micorrizas desde la década de los 80, donde se evaluó su importancia agronómica en cultivos tropicales como la yuca y algunas pasturas. Se iniciaron trabajos de recolección

de hongos nativos, aislamiento e identificación de Micorrizas originarias del Valle de Cauca y Llanos Orientales.

En Colombia existen diversas investigaciones del uso de Micorrizas Arbusculares y otros materiales orgánicos para la potencialización de las características de la planta y utilización de estos mecanismos como suplementación del uso de fertilizantes químicos. Casos como el de algunos estudiantes de la Universidad Tecnológica y Pedagógica de Tunja realizan investigaciones en el uso de la Micorriza con gallinaza para la producción de cebolla cabezona. La colonización de las plantas de cebolla con hongos micorrícicos, induce un incremento en la producción de biomasa y por ende, en el diámetro del bulbo [7].

Los microorganismos analizados Micorriza Arbuscular que de ahora en adelante nos referiremos a ellos como (MA), de forma individual y en mezclas, aportan beneficios importantes para las plantas. Entre ellas la estimulación del crecimiento y la supresión de enfermedades, notando que la utilización de estos microorganismos es de amplio espectro, en cuanto a las especies vegetales, que abarca y los patógenos que regula [10].

2.1.6 Pasto Vetiver

El pasto Vetiver es una planta de origen sur asiático especialmente en las regiones de Indonesia y sur de India. Es una planta de desarrollo rápido y altamente resistente a la sequía, como también algunas clases de contaminantes presentes en el suelo. Sus raíces crecen verticalmente y de manera progresiva, razón por la cual se argumenta su eficiencia en la restauración de taludes erosionados [11]. Llegando a alcanzar una longitud de dos metros y medio, pero se han encontrado especímenes de cinco metros de longitud radicular. Es estéril, no invasiva con otros cultivos.

El sistema de Vetiver fue desarrollado en 1980 por el banco mundial de suelos y conservación de agua en India, su nombre científico es *Chrysopogon Zizanioides*. Este sistema descubrió que el Vetiver tiene una alta efectividad en la estabilización de pendientes empinadas, debido a la forma erguida y rígida de sus tallos que realizan una cobertura densa muy efectiva en el retardo del flujo del agua. Además, reduce el poder de la erosión debido a la lluvia. [11]



Figura 2-5 Comparación de tres tipos de densidades de Vetiver en West Java Indonesia. Fuente: Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con Vetiver (2017).

Se lo conoce como “la barrera contra la erosión”. Por si sola, resulta ser ideal en temas de estabilización por sus características de resistencia y adaptabilidad a cualquier superficie, proporcionando una estructura viva al interior del suelo, reteniendo las partículas que sean susceptibles a desprenderse de la ladera. [1]

El sistema de raíces del Vetiver puede alcanzar una profundidad de 200 cm en un año y el incremento diario de las raíces desde aproximadamente 10 mm. [1]. Varios investigadores han llevado a cabo estudios para determinar la capacidad de retención de sedimentos del Pasto Vetiver e informaron que, comparado con un suelo desnudo, el Vetiver fue capaz de reducir el escurrimiento y la erosión total del suelo en una proporción del 73% y 98% respectivamente. Bajo condiciones de lluvia se encontró que el pasto puede reducir sustancialmente la pérdida de suelo y escurrimiento en comparación con el tratamiento a través de otras barras vegetales. [1]

Alguno de los usos que tiene el Vetiver, además del objetivo principal que es el control de la erosión y la estabilización de taludes para esta investigación, se pueden añadir los beneficios trascendentales que traen al sector de la agricultura en la región del Meta y la descomposición que produce en los materiales tóxicos alrededor del sembradío lo que significaría una purificación del agua que pasa cerca de las raíces. [11]

Para realizar un conocimiento previo de los beneficios en la agricultura, nombraremos principales utilidades de conservación de suelos, mejora de la humedad del suelo, recarga de aguas subterráneas, reciclaje de nutrientes del suelo, control de plagas, forraje, limpieza de aguas residuales contaminadas por uso agrícola y protección de la infraestructura de la granja. El sistema con Vetiver reducirá la pérdida de suelo de las tierras agrícolas hasta en un 90% y reducirá la escorrentía de lluvia en hasta un 70%, lo que aumentará significativamente la lluvia efectiva disponible para los cultivos. El impacto va más allá: las aguas

subterráneas se recargan en la medida en que las corrientes efímeras fluyen cada vez más fuerte, los humedales se rejuvenecen, el hábitat de la vida silvestre mejora y la fertilidad del suelo también, lo que conlleva a un aumento del rendimiento de los cultivos que se ha medido hasta en un 40%. [11]

La erosión en los suelos es un problema cotidiano en todo el planeta y que con el pasar de los años provocará que las tierras cultivables tengan cada vez menos potencial para ser utilizadas. No se tenga una producción adecuada debido a pérdida de las primeras capas de la zona de siembra, estos fenómenos se deben al aumento de la población que exige que se produzca una mayor cantidad de comida con una breve cantidad de tiempo entre la siembra de los cultivos lo que lleva a los suelos a verse totalmente afectados e irreversibles. Esta pérdida de suelo produce problemas mayores a largo plazo como son el aumento de la escorrentía, menor paso del agua de lluvia a formar parte de las corrientes subterráneas y esto causará un aumento en los caudales de los ríos e inundaciones en los sectores poblados, disminución en el acceso al agua potable por esta razón, algunos países de climas tropicales y semitropicales se han sumado a esta estrategia para la conservación de suelos y mejora en el manejo de cultivos.

En cuanto a la protección de taludes que es uno de los temas pilares de nuestra investigación encontramos información donde señalan que el Vetiver contrarresta los efectos producidos por la lluvia en este tipo de terrenos inclinados. Asimismo producen una erosión y un aumento en la presión de poros que en la mayoría de casos al contar con las condiciones óptimas se reflejará en fallas de pendiente, deslizamiento y en graves flujos de sedimentación. El Sistema Vetiver puede efectivamente y a bajo costo, proteger pendientes, detener o reducir significativamente el riesgo de deslizamiento y prevenir la contaminación del agua corriente abajo. Esto se debe a que las raíces de Vetiver tienen una alta resistencia a la tracción, un promedio de (75 MPa) que puede aumentar la resistencia al cizallamiento del suelo en un factor de 40, y porque cuando se planta en pendientes, el Vetiver reducirá las presiones hidráulicas de pendiente a través de la eliminación del agua. [11]

2.2 MARCO LEGAL

Con el propósito de enmarcar el desarrollo de la investigación dentro la legislación pertinente y aplicable al tema en estudio, se realiza el siguiente cuadro donde son enunciadas las normas por las cuales ha de regirse el proyecto y las cuales serán consultadas siempre que la situación lo demande. [12], [13], [14].

Tabla 2-1 **Esquema de marco normativo**

NORMA	DESCRIPCIÓN	TEMA	OBJETO
Norma INVÍAS I.N.V E-123	Ensayos de granulometría	Estudios geotécnicos	El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.
Norma INVÍAS I.N.V E-125	Ensayos de determinación del límite líquido	Estudios geotécnicos	El límite líquido de un suelo es el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico.
Norma INVÍAS I.N.V. E-126	Ensayos de límite plástico e índice de plasticidad	Estudios geotécnicos	El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua, determinado por este procedimiento, en el cual el suelo permanece en estado plástico, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo.
Norma INVÍAS I.N.V E-102	Clasificación completa de acuerdo al sistema unificado de clasificación	Estudios geotécnicos	Esta práctica describe un procedimiento para identificar suelos y se basa en el sistema de clasificación unificada. La identificación se hace mediante un examen visual y mediante ensayos

Tabla 2-1 **Esquema de marco normativo**

NORMA	DESCRIPCIÓN	TEMA	OBJETO
			manuales.
Norma INVÍAS I.N.V. E-122	Ensayos de humedad natural	Estudios geotécnicos	Este método cubre la determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado por peso.
Norma INVÍAS I.N.V. E-154	Ensayos de Corte directo	Estudios geotécnicos	Esta norma tiene por objeto establecer el procedimiento de ensayo para determinar la resistencia al corte de una muestra de suelo consolidada y drenada, empleando el método de corte directo.
Norma INVÍAS I.N.V. E-151	Ensayos de consolidación	Estudios geotécnicos	Este método se refiere al procedimiento para determinar la rata y la magnitud de la consolidación de muestras de suelos cuando se confinan lateralmente y se drenan axialmente mientras se someten a incrementos controlados de esfuerzo vertical.
Resolución 000356	Manual de normas técnicas para el control de erosión	Estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos	Por el cual se adopta el manual de normas técnicas para el control de erosión, para la realización de estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos y para la ejecución de proyectos de desarrollo.

Tabla 2-1 **Esquema de marco normativo**

NORMA	DESCRIPCIÓN	TEMA	OBJETO
Resolución 000356	Recomendaciones y diseño de las obras de estabilización	Estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos	En el caso en que los factores de seguridad para estabilidad de taludes en condiciones estáticas sean inferiores a 1.5 se requiere presentar las recomendaciones de las obras de estabilización, pudiendo ser revegetalización u obras de bioingeniería.
Convenio interadministrativo. 0587 – 03	Manual Para la Inspección Visual de Obras de Estabilización	Revestimiento de Taludes	Se emplea vegetación que puede fijarse con geo mallas mientras germina o enraíza. También pueden colocarse cespiones de pasto asegurados al talud con estacas de madera
EPM	Norma de construcción de protección de taludes	Revestimiento de Taludes	Los pastos ayudan a controlar diferentes factores que influyen en la inestabilidad de los taludes, ya que permiten el aislamiento del suelo de las fuerzas de tracción que genera el flujo de agua de escorrentía. Adicionalmente, las raíces conforman una red densa que refuerza el suelo superficial aumentando su resistencia al corte y a la erosión.

Fuente: Autor

2.3 ESTADO DEL ARTE

Para abordar el avance del conocimiento en el área que se está investigando, es necesario seguir dos caminos diferentes. El pasto Vetiver y su trayectoria como mecanismo controlador de erosión y estabilización de terrenos inclinados. Segundo, las Micorrizas y su efecto en las plantas que coloniza, gracias a su proceso biológico.

Debido a que en el ámbito de la ingeniería, no se tiene registro de algún intento por controlar la erosión utilizando la combinación entre estas dos técnicas, para controlar procesos erosivos y generar estabilidad, gracias al afianzamiento de la raíz mutada por efecto del hongo. Se procede a analizar, cómo se han venido desarrollando estos dos componentes importantes de la investigación, cada una por su parte.

2.3.1 Hongo formador de Micorrizas arbusculares

En cuanto al Hongo formador de Micorrizas Arbusculares, que es la especie del hongo que se está estudiando, se puede decir que hay diversas investigaciones dirigidas sobre todo al área agrícola, aunque también, importantes disertaciones como la titulada “hongos micorrícicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad”, realizada en Chapingo, México, donde se hace explícito que la estructura del suelo, entendiendo estructura como la capacidad del suelo mismo para formar agregados, producto de la unión de unidades más básicas, gracias a distintos efectos de cohesión existentes en el suelo. Pudiendo ser por procesos Físico – Químicos o biológicos, siendo los biológicos los de interés, pues a diferencia de los primeros, forman agregados aún en presencia de agua. [15]

Este factor biológico que favorece la estructura del suelo, está dado por excrementos de mesofauna, atrape de partículas gracias a raíces y pegamentos naturales producidos por hongos y bacterias. [15]

En cuanto a hongos se refiere, se sabe que sus hifas, que forman un componente fundamental de su estructura, segregan o exudan polisacáridos, que son polímeros con cantidades de azúcar, que se descomponen y actúan como cementante, formando una malla pegajosa que une las partículas y micro agregados del suelo, formando macro agregados con más estabilidad. Ver [15]

2.3.1.1 Hongos micorrícicos arbusculares en la estabilidad de agregados.

En lo que respecta a los hongos formadores de Micorrizas Arbusculares, se sabe que tienen la capacidad de asociarse con más del 85% de las especies vegetales, aportando múltiples beneficios, incluyendo mayor transporte de alimentos, protección ante patógenos externos, salinidad, sequia, acidez y elementos tóxicos. Además de esto, se ha reportado que el comprobado aumento en la cantidad de hifas en las raíces de plantas, tiene influencia considerable sobre la estabilidad de los agregados. [15]

Extrayendo el resumen, proporcionado por “hongos micorrícicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad”, los procesos por los cuales los HFMA se consideran un agente importante en la agregación y fortalecimiento de la estructura del suelo, son: 1) enlazamiento físico por desarrollo extensivo de las hifas externas en el suelo, creando un esqueleto estructural que brinda un anclaje mecánico al mismo; 2) enlazamiento químico, debido a la glomalina que las hifas producen y excretan en las raíces colonizadas y en el suelo; 3) creación de un ambiente apto para el sano crecimiento de las raíces y las hifas; 4) envolvimiento de micro agregados en macro agregados pequeños y la creación de la estructura del macro agregado; 5) creación de condiciones adecuadas para el desarrollo de otros microorganismos de la rizosfera que están involucrados en la formación y estabilidad de agregados. [15]

2.3.2 Pasto Vetiver

Por otro lado el Vetiver fue incluido dentro de proyectos de investigación por el Banco Internacional de Desarrollo en 1980 y empieza a expandirse por todo el mundo, por su amplia variedad de aplicaciones en diversas soluciones de problemas, esta planta originaria de la India con una estructura radicular bastante amplia y resistente a condiciones ambientales extremas se ha aplicado a la bioingeniería, perfumería, tratamiento de aguas, mitigación de inundación, rehabilitación de tierras, conservación de suelos en fincas, estabilización de taludes y control de la erosión del suelo. Estas dos últimas muy importantes para nuestra investigación, por eso vamos abordar los avances y algunos proyectos establecidos.

Una aplicación de Vetiver se realizó en Indonesia en las laderas del río Citarum que abastece principalmente a las ciudades de Yakarta y Bandung con agua y también sirve para el riego de los cultivos y abastecimiento de las industrias en el norte de Java, el sistema con Vetiver presentó mejoras particulares y detuvo periódicamente la erosión del suelo en las zonas afectadas, otra observación fue que realizó tratamiento del agua que estaba afectada por vertimientos de las industrias aguas abajo. Los principales problemas que tiene esta cuenca es la deforestación a causa de la siembra de monocultivos y con ellos el uso de fertilizantes químicos y pesticidas que son vertidos indirectamente al río.

Otro proyecto en la zona pero en la isla de Bali, es la estabilización de terrazas de laderas escarpadas, que permiten el transporte y protegen los caminos para llevar vegetales orgánicos para las comunidades empobrecidas y desnutridas. [15]

Cambiando de continente, en Centroamérica no se quedan atrás con la aplicación de estas nuevas tecnologías, en El Salvador debido al uso intensivo de los suelos, el descuido de los recursos naturales y una población creciente, han generado grandes problemáticas en el aspecto de erosión de suelos y deslizamientos que ocurren en varios lugares del país. Una empresa privada se interesó por solucionar este tipo de problemas. Desarrolló proyectos con su principal componente el pasto Vetiver su forma de trabajar con la comunidad, capacitando y

educando y transfiriendo el conocimiento en la tecnología, cómo en el sector de las Colinas, algunos de protección de caminos rurales y protección de taludes. Demuestran un aumento en el componente estructural de los taludes, una reducción en el volumen de la escorrentía y una baja pérdida de los suelos.

En Vietnam efectuaron la aplicación del Vetiver para el control de la sedimentación y de la erosión de las tierras, resaltan que la raíz de la planta es tan poderosa, que hacen los lugares donde esta se encuentra la estructura del suelo es mucho más fuerte, en el proceso determinan en el primer año un alcance de dos a tres metros de profundidad, destacan que el crecimiento de esta planta es mucho más rápido que la de un árbol convencional y su forma de crecimiento afecta mucho menos; la pérdida de suelos se reduce hasta en un setenta por ciento y adicionan que al mismo tiempo hace muy difícil el desalojo suelo, extremadamente tolerable a la sequía y su raíz es tan fuerte que puede penetrar un perfil de suelo muy compactado como bloques de arcilla que son normales en suelos tropicales. [17]

En Colombia han elaborado la viabilidad de la implementación del pasto Vetiver para la estabilización de taludes, concluyendo que los suelos altamente erosionables, pendientes pronunciadas y precipitación alta, el Vetiver puede reemplazar las soluciones costosas que se aplicarían en este tipo de características. Debido a que es un material vivo que actúa como un muro que estabiliza las pendientes. Además de ser una alternativa ecológica con un mínimo de inversión. Sin embargo, en Colombia radica una cultura en la que se prefiere aplicar sistemas correctivos que preventivos, aumentando los costos drásticamente por mitigar los deslizamientos luego de ocurridos. [16]

No se encuentran referentes o algún índice de investigación aplicada en la bioingeniería de estabilización de taludes con los dos sistemas al mismo tiempo y por esta razón nos da un buen panorama para la investigación, donde se indaga en resultados que mejoren y aumenten el potencial de las habilidades del pasto Vetiver conocidas ya en todo el mundo.

2.4. CONCLUSIÓN DEL CAPÍTULO

De acuerdo con el evidente desarrollo en conocimiento en cuanto a pasto Vetiver para control de erosión, y en Micorrizas Arbusculares, para potenciar las características físicas de las plantas y la estructura del suelo, se puede decir que, al realizar una combinación entre ambas técnicas, se tiene una herramienta muy grande, aplicable directamente al problema del control de la erosión en taludes y la estabilidad del mismo. Hecho que se pondrá a prueba a continuación.

3 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS

Se llevará a cabo visitas a diferentes zonas del Piedemonte Llanero en el municipio de Villavicencio para identificar el talud a utilizar para la investigación donde se tendrá en cuenta factores como ubicación, condiciones óptimas de acceso, luz solar relativa, ángulo de inclinación, composición de la superficie del suelo y seguridad del equipo investigador.

Una vez ubicado el talud sobre el cual se implementará y evaluará la técnica de estabilización, se realizarán dos tipos de estudio. El primero, climatológico, de manera teórica con el propósito de determinar las condiciones e intensidades de los agentes causantes de erosión, en los cuales también, se desarrollará la planta y el hongo. El segundo estudio, un análisis geológico de la zona, con base en datos proporcionados por el instituto geológico colombiano.

El sondeo estará compuesto por un sitio de extracción, dicha extracción de suelo se llevarán al laboratorio de suelos de la Universidad Santo Tomás campus Aguas Claras en Villavicencio, a la profundidad de tres metros, que fue establecida dada la posible longitud de influencia de la raíz del pasto Vetiver. Es necesario conocer en qué condiciones se desarrollará la planta, teniendo en cuenta que en esa profundidad se alcanzará gran parte del desarrollo radical total de la misma, pudiendo llegar hasta los cinco metros. Para complementar este proceso se realizará una inspección visual para determinar la diferencia entre estratos, color, cantidad de materia orgánica y demás componentes que se pueden determinar de forma visual.

Una vez se implemente la técnica en campo, como se describirá posteriormente, se realizarán los ensayos de suelos para determinar las propiedades mecánicas del mismo y su cambio en tres condiciones diferentes. Suelo descapotado, suelo con Vetiver y suelo con Vetiver micorrizado. Esto se realizará en dos fases, una fase inicial, al momento de hacer el descapote y la siembra, y la otra, cuatro meses después, a fin de cuantificar el cambio producido. Los mencionados ensayos a realizar, incluyen, ensayo de corte directo, granulometría, límites de Atterberg e índice de plasticidad.

Dado un convenio particular que se logró con la Universidad del Tolima, se contó con la asesoría especializada de su grupo de investigación GEBIUT, quienes nos brindaron la asesoría necesaria, en cuanto al componente biológico de la investigación, dada la relación entre el pasto y el hongo y la alteración, producto de esta relación. Se nos indicará, cómo funciona la Micorriza, que ocurre cuando se implementa en un cultivo, su comportamiento en diferentes tipos de planta y los cuidados en el proceso de población del hongo formador de Micorrizas. Además, el laboratorio de la Universidad del Tolima, realizará un análisis químico a una muestra de suelo extraída de la zona de estudio, para determinar la composición mineralógica en la cual se desarrollará la asociación planta – hongo.

Se procederá a efectuar un levantamiento topográfico del talud seleccionado, para conocer su cambio de pendientes, altura, inclinación predominante y la ubicación de la zona de aplicación con referencias geoespaciales. Con estas mediciones se construirá en el talud analizado tres áreas de cincuenta metros cuadrados cada una, dos de ellas contarán con Vetiver en un sistema matricial acorde a la inclinación del terreno, de las cuales se tendrá en un área, el Vetiver bajo la técnica planteada de micorrización brindada por el grupo GEBIUT y en la otra, el Vetiver sólo sin alteración alguna. La tercera área estará totalmente descapotada. Implementada la técnica, se tendrán los debidos cuidados como podas, riego (de ser necesario), control de maleza y protección de plagas o agentes que puedan perjudicar el cultivo en su crecimiento hasta la edad de siembra de cuatro meses donde se procederá a realizar una extracción de la zona de siembra a medio metro de profundidad para realizar de nuevo los ensayos de laboratorio descritos anteriormente. De este modo, caracterizando los resultados del Vetiver con Micorrizas, sin Micorrizas y el terreno descapotado y comparando con las muestras tomadas en el inicio para determinar en el mismo nivel de la superficie del suelo, la afectación de la presencia de raíces y Micorrizas. Paralelamente se hará la recolección de algunas muestras de plántula para comparar su desarrollo en cada una de las condiciones aplicadas.

En la fase final, se analizará los resultados y se describirá las diferencias mecánicas del suelo, si las hay, entre la técnica propuesta y a técnica habitual del pasto sin alterar.

3.2 RESULTADOS DE EJECUCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS

3.2.1 Definición del sitio de aplicación

Para la definición del lugar de aplicación se plantearon tres lugares, el primero en el sector de Buenavista vía antigua Bogotá - Villavicencio donde se tiene un caso fuerte de remoción en masa y deslizamientos de tierra y roca, afectando a la población aledaña de la zona. Se realizaron una serie de visitas al lugar, para hacer un análisis de la factibilidad en conjunto con otros proyectos de investigación de la Universidad Santo Tomás Villavicencio que tenían intereses en otros aspectos de la problemática.

La zona brindaba un acceso limitado para realizar trabajos en campo, por la pendiente de inclinación y la inestabilidad en el talud. Por el tiempo en que la zona estuvo en inspección, presentó con frecuencia deslizamientos que desaparecían amplias zonas de terreno, presentando incluso riesgos a la seguridad de los desarrolladores del proyecto. El mencionado sitio era recomendable por otros factores, pues presentaba un caso real de erosión, brindaba condiciones de luz solar y precipitaciones adecuadas para el desarrollo de la planta. Además era un reto la solución de esta problemática que golpea constantemente esta carretera tan importante a nivel nacional. Sin embargo, se decidió prescindir por cuestiones de seguridad y acceso.



Figura 3-1 Zona posible de aplicación de la investigación en Buenavista. Fuente: Autor

La antigua vía a Restrepo entre los kilómetros K1+000 y K5+000, se encontraron taludes adecuados para la aplicación por encontrarse cerca del perímetro urbano en comparación con el sector de Buenavista con características de Piedemonte llanero, excelente para una elección. La seguridad era adecuada, al igual que las inclinaciones aparentes y la accesibilidad óptima. Se realizaron dos visitas a la zona con presencia del director del proyecto y demás integrantes del semillero de investigación Sistemas Constructivos (SISCO). Se llegó a un acuerdo para comenzar el acercamiento con las personas propietarias de los predios, encontrando como inconveniente que sólo se encontraban encargados de cuidar el territorio y no contaban con la autoridad necesaria para determinar si se podría permitir la construcción de los diseños finales.

Se intentó proceder con un acercamiento con los dueños oficiales por varios medios como correo electrónico, llamadas telefónicas y citas previas para elaborar la exposición de los fines de la investigación, pero nunca fue posible obtener respuesta positiva, debido que por el tamaño de las fincas consideraban que era un costo muy alto y no les resultaba a benéfico a corto plazo, ni oportuno por que no presentaban ningún riesgo aparente de remoción en masa o deslizamientos de tierra. Por esta razón no fue posible realizar la aplicación dentro de esta ubicación, más que por problemas de condiciones del terreno que afectarán directamente la investigación.



Figura 3-2 Posible zona de aplicación sector vía antigua Villavicencio - Restrepo.
Fuente: Autor

Luego de estar en la constante búsqueda de un lugar adecuado para materializar el proceso de siembra, se realizan conversaciones con los responsables de infraestructura de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio, con la intención de préstamos de una superficie dentro de la universidad sede Loma Linda adecuada donde ya se habían realizado visitas. La zona queda ubicada en el cinturón denominado Piedemonte llanero. Lo que más motivó para realizar la intervención en ese lugar fue que, no muy lejos hay una población que vive en las mismas características como las que se quieren solucionar y prevenir en los objetivos estipulados en el estudio, donde se presentan riesgos altos de remoción en masa y deslizamientos de tierra, el lugar al que se hace referencia recibe el nombre de la Nohora.

Las directivas permitieron realizar lo propuesto en este lugar, concediendo una zona de aplicación con características ideales de luz, precipitación, inclinación adecuada, accesibilidad, seguridad y apoyo de personal de ser requeridos para ciertas labores dentro del proyecto como por ejemplo la adecuación de los alrededores delimitados para el trazado o croquis. En la siguiente imagen se enseña el estado inicial del talud con vegetación de tamaño pequeño – mediano con presencia de algunas rocas y arboles a los alrededores que no generan sombras que afecten el cultivo.



Figura 3-3 Elección de la superficie de aplicación. Fuente: Autor

3.2.2 Estudios iniciales

3.2.2.1 Climatología

Con el único propósito de hacer evidentes las condiciones climatológicas existentes en la zona de estudio, y facilitar la comparación con futuras investigaciones, se facilitan los siguientes datos, brindados por Instituto de Hidrología y Meteorología (IDEAM). La precipitación media anual encontrada fue de 3671 mm/año, correspondiente a una media de 300,6 mm/mes. En la región de acuerdo a la estación se presenta un régimen de precipitación bimodal, con periodos húmedos entre abril a octubre, y picos en abril, mayo y junio. Los mayores valores de precipitación son los de mayo (650,3 mm). Los meses con menor precipitación son enero (88,7 mm) y febrero (99,8 mm). [2]

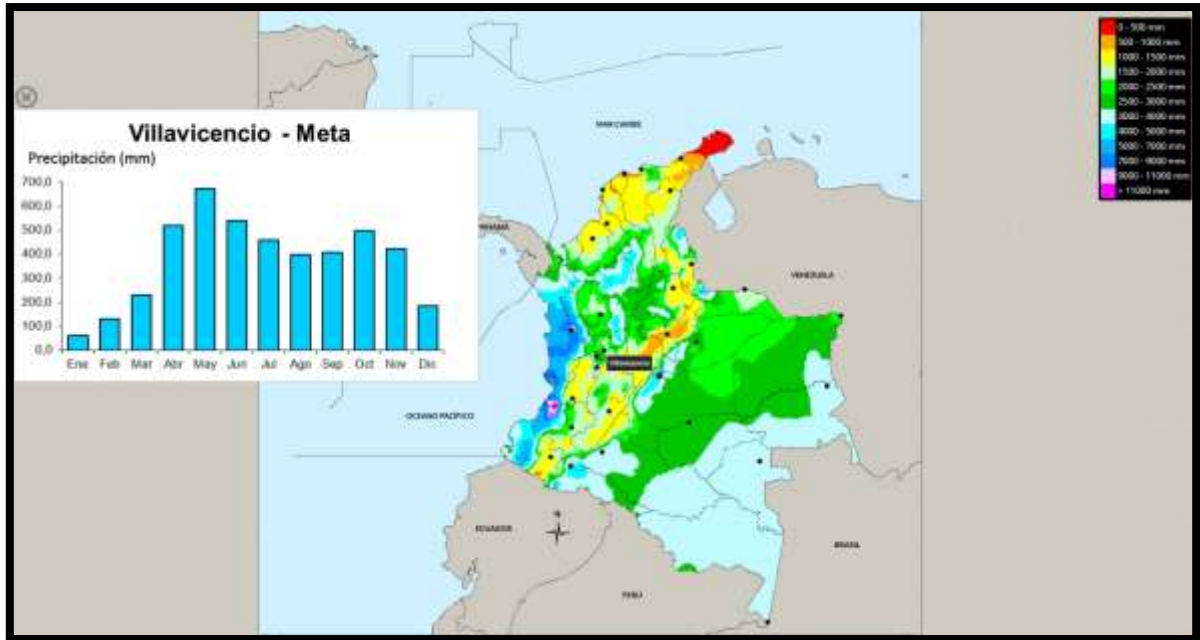


Figura 3-4. Mapa precipitación media total anual de Colombia. Fuente: IDEAM, (2018)

La temperatura media es de 25,3°C, con valores máximos de 28,1 °C en enero y media mínima de 22,9°C en junio, para el periodo de registro 1983- 2012. La humedad relativa presenta un promedio mensual de 81%. En los meses de enero a marzo se tienen valores de humedad relativa inferiores al promedio mensual del orden de 74%. [2]

3.2.2.2 Geología de la zona de estudio

Según el mapa geológico del servicio geológico de Colombia, Villavicencio está ubicado en la zona que se puede dividir en dos formaciones geológicas, una de abanicos aluviales y depósitos coluviales de la edad del cuaternario y otra con conglomerados de bloques a guijos con intercalaciones de arcillas y arenitas de grano fino a grueso de la edad del Plioceno-Pleistoceno, que se presentan a la salida del Piedemonte oriental de la cordillera.

Los depósitos coluviales están presentes tanto en climas áridos como secos, tienen apariencia de conos o pequeños abanicos, los cuales no cuentan con un espesor importante ya que corresponden a acumulaciones locales sin mucho transporte. En algunos casos, pueden formarse en las cabeceras de terrazas aluviales dando la apariencia de ser un mismo depósito.

De manera similar, los depósitos aluviales suelen ubicarse en quebradas y superficies topográficas amplias. A diferencia de los coluviales, tienen un espesor más apreciable y conforman terrazas más desarrolladas especialmente en los márgenes de valles fluviales, denominados generalmente vegas. Se hallan a lo

largo de los ríos Guatiquía, Ocoa y Upin, que al salir de la cordillera forman un sistema entrelazado con muchos brazos en su lecho y frecuentes desplazamientos. En determinadas ocasiones, las terrazas aluviales están representadas por niveles bien estratificados. Compuestos por detritos mal clasificados cuya granulometría varía desde gravas de cantos y gránulos hasta arenas de grano grueso.

3.2.3 Apique en suelo

Con el propósito de inspeccionar y estudiar las capas que posee el suelo en la zona de aplicación, se realiza una excavación en el suelo a una profundidad de 1.50 m, con un área de 0,50 m². Esto nos permitió tener un examen visual de los estratos, condiciones del nivel freático y los componentes del suelo. Se tuvo problemas para alcanzar la profundidad de un metro y medio debido a que en la zona había presencia de rocas de tamaño entre pequeño y mediano, con diámetros de 23 cm a 15 cm. La perforación se realizó con herramientas manuales como pica barra y pala sin encontrar nivel freático a esta profundidad.



Figura 3-5. Apiques y toma de muestras. Fuente: Autor

Al finalizar la perforación se concluyó que se encontraron tres estratos de suelo diferentes, el primero con una altura de 11 cm que comprende la parte del humus del suelo, la segunda y la tercera capas intermedias con tamaño de 72 cm y 67 cm respectivamente.

Para realizar pruebas de laboratorio se procede a tomar muestras con el fin de analizar la granulometría y los límites de Atterberg, para lo cual se tomaron dos muestras con protección de parafina para mantener las propiedades intactas del suelo halladas por cada capa del suelo identificado. En la siguiente imagen se muestra la división de los estratos del suelo de Loma Linda.



Figura 3-6. Estratos del suelo. Fuente: Autor

3.2.3.1 Estructura del suelo

Con respecto a la estructura del suelo, la cual se refiere a la forma en que se da el “agrupamiento” natural entre los agregados, de acuerdo a la diferencia granulométrica existente en el mismo. Se puede decir que la estructura de suelo que predomina, dados los horizontes hallados en el perfil, luego de realizar un apique de 1,5 metros de profundidad, se clasifica dentro de los denominados, granulares y grumosos, con resistencia a la desagregación moderada. Con la cohesión y compacidad mecánica suficientes y al mismo tiempo con los poros suficientes para drenaje y crecimiento de plantas.



Figura 3-7. Efecto de la raíz en la estructura del suelo. Fuente: Autor

La estructura de un suelo, depende de la estructura de sus agregados y la cementación o agrupación de los mismos [17], a su vez esto es resultado de diversos factores, como el contenido de arcilla y sus cationes intercambiables, presión causada por la raíces de plantas, presencia de microorganismos, materia orgánica e incluso presencia de hifas de hongos.

Por lo anterior, se puede decir que la técnica implementada en el talud en estudio, funciona como una correlación de beneficio mutuo entre las plantas, hongos y suelo, pues las primeras se benefician de la estructura del suelo, al encontrar allí suficiente aire y agua para las raíces de la misma, manteniéndolas además, firmes y erguidas. A esto, recíprocamente la planta responde, mejorando aún más la estructura del suelo y evitando el exceso de agua en el mismo, eliminando la indeseada saturación mediante un buen drenaje. [17].

3.2.4 Análisis físico - químico del suelo, Universidad del Tolima

Los resultados entregados por la Universidad del Tolima, del análisis físico químico del suelo, se presentan en el anexo A. Allí, se encuentra relacionada la información, la cual consiste en porcentajes de composición del suelo en cuanto a granulometría y contenido de elementos químicos.

Los Apiques para la extracción de las muestras, se realizaron dentro de la zona denominada Piedemonte llanero, en la vereda Buenavista del municipio de Villavicencio, porque inicialmente allí se iría a poner en práctica la técnica de

estabilización con Vetiver y Micorrizas. Como se mencionó anteriormente en la etapa de selección de la zona de aplicación, por inconvenientes, no se pudo realizar la siembra en ese lugar, y se trasladó a un talud dentro del predio de la universidad santo Tomás, Villavicencio, sede Loma Linda.

Sin embargo, dada la similitud de condiciones por encontrarse dentro de la misma región, se presenta los datos de composición química del suelo, que, aunque se entiende no han de ser iguales, sirve para dar una idea del tipo de elementos químicos que se encuentran en los suelos de la zona.

Para efectos de conocer las condiciones óptimas de la inoculación del hongo en la planta, no se han seguido estas recomendaciones, sino las propias del producto utilizado. Es decir, las especificaciones propias entregadas por las empresas suministradoras tanto del Vetiver, como del hongo formador de Micorrizas Arbusculares, y en análisis del suelo realizado por el equipo investigador.



Figura 3-8. Asesoría en laboratorio de Micorrizas, U. Tolima. Fuente: Autor



Figura 3-9. Muestras de plantas alteradas con Micorrizas Arbusculares. Fuente: Autor

Los comentarios entregados por el grupo investigador de la Universidad del Tolima, son:

“De acuerdo a lo observado en el resultado de los análisis físico químico realizado a muestra de suelo colectada en la vereda Buenavista del municipio de Villavicencio, el suelo presenta características físicas franco arcillosa con pH muy bajo (3,7: ácido), la materia orgánica es baja por lo que para cultivo de pastos se recomienda una adición de Micorrizas de 1,5 ton/ha y aplicar cal como correctivo. Los nutrientes presentes en el suelo tienen tendencia a la baja así: Cobre, Zinc y Potasio. Sin embargo, el Aluminio, Fósforo, Manganeseo, Calcio, Hierro y Boro se encuentran en condiciones adecuadas”.

3.2.5 Sondeo del suelo

El sondeo realizado en la zona de estudio, estuvo a cargo de la empresa Geolab, Contratada para realizar dos muestreos con ensayo SPT cada uno de 3 metros, en el área de cultivo. La información recopilada se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3-1. Datos generales del procedimiento a ejecutar

Nombre	Estabilización de taludes por medio de Vetiver y Micorrizas arbusculares
Localización de la obra	Sector Soceagro sede Loma Linda Universidad Santo Tomás Villavicencio
Empresa encargada	GeoLab
Equipo de perforación	Muestreador de tubo partido de 1 1/2
Condiciones climatológicas	Soleado temp. 32° C
Fecha, Hora inicio – final	29/09/2018
Numero de perforaciones	2
Localización de la perforación	946237.808 1046823.032
Elevación de la perforación	491.250 msnm

Fuente: Autor

Tabla 3-2. Descripción del sondeo #1

Sondeo # 1 Zona sin Micorrizas	N° de golpes	Z Profundidad (m)	Descripción
Muestra inicial	0	0,70	Arenas arcillosas de baja plasticidad color café presencia de material granular consistencia media.
Muestra #1	12	1,40	Arenas arcillosas de baja plasticidad color amarillo con vetas blancas presencia de material granular consistencia media.
Muestra #2	43	2	Arenas arcillosas de baja plasticidad color amarillo con vetas blancas presencia de material granular consistencia media.
Muestra #3	61	3	Arenas arcillosas de baja plasticidad color amarillo con vetas blancas presencia de material granular consistencia media.

Fuente: Autor

Tabla 3-3. Descripción del sondeo #2

Sondeo # 2 Zona con Micorrizas	N° de golpes	Z Profundidad (m)	Descripción
Muestra inicial	0	0,80	Arenas arcillosas de baja plasticidad color café presencia de material granular consistencia media.
			Arenas arcillosas de baja plasticidad color

Tabla 3-3. Descripción del sondeo #2

Sondeo # 2 Zona con Micorrizas	Nº de golpes	Z Profundidad (m)	Descripción
Muestra #1	18	2	amarillo con vetas blancas presencia de material granular consistencia media.
Muestra #2	33	2,60	Arenas arcillosas de baja plasticidad color amarillo con vetas blancas presencia de material granular consistencia media.
Muestra #3	25	3,10	Arenas arcillosas de baja plasticidad color amarillo con vetas blancas presencia de material granular consistencia media.

Fuente: Autor



Figura 3-10. Ejecución del sondeo y toma de muestras. Fuente: Autor

Se realizó un sondeo a la profundidad establecida de 3m, a continuación, se lleva al fondo de dicha perforación una cuchara normalizada que se hinc 15 cm en la capa reconocer a fin de eliminar la zona superficial parcialmente alterada. Se hace entonces una señal sobre el varillaje y se cuenta el número de golpes N necesarios para hincar de nuevo la cuchara la profundidad de 1 ft 30 cm, la masa que se utiliza para esto pesa 140 libras y su altura de caídas de 30 pulgadas lo que corresponde a un trabajo de 0.5 KJ por golpe aproximadamente.

Al aplicar todos los estándares de la norma. ASTM D 1586Se obtienen los siguientes resultados para Los estratos de suelo hallados:

Tabla 3-4. Resultados sondeo #1

SONDEO # 1				
Z(m)	N (Valor obtenido en el campo)	Grado de compacidad	Res.penet. estática (Kg/cm2)	B adm (Kg/cm2)
1	12	0.42	40	35.5
2	43	0.73	172	43.25
3	61	-	-	-

Fuente: Autor

Tabla 3-5. Resultados sondeo #2

SONDEO # 2				
Z(m)	N (Valor obtenido en el campo)	Grado de compacidad	Res.penet. estática (Kg/cm2)	B adm (Kg/cm2)
1	18	0.48	18	37
2	33	0.63	132	40.75
3	25	0.55	100	38.75

Fuente: Autor

3.2.6 Preparación del terreno

La preparación del terreno tiene como objetivo permitir la construcción del perímetro de aplicación de una forma ordenada y con el menor error posible, así como facilitar la observación del comportamiento de la superficie intervenida. Se trata de un proceso sencillo y de bajo costo que puede ser ejecutado con rapidez. En el proceso fue necesario el retiro de capa vegetal, incluyendo plantas bajas y arbustos, para que no sean obstáculo. Se realiza también para evidenciar y empezar con las observaciones sobre la erosión producida en el terreno por los agentes físicos externos.

Las condiciones de acceso interno también deben reunir las condiciones mínimas que garanticen el ingreso fácil y seguro para realizar las siembras y procesos que demande el proyecto, topografía, podas, fertilización. Así como también un análisis del tipo de suelo y características aparentes que se pueden hacer por esta adecuación.



Figura 3-11. Limpieza y descapote del área de 100 m². Fuente: Autor

3.2.7 Topografía

La finalidad de desarrollar un levantamiento topográfico es realizar una representación del terreno donde se realizó la aplicación de la siembra para observar el comportamiento del talud, dimensiones, pendiente, ondulaciones y demás variaciones topográficas presentes en el terreno.

Se realizó el levantamiento topográfico en altimetría y detalles para generar curvas de nivel cada metro al igual que obtener los detalles de la forma de los montículos presentes en el lugar para que pudieran ser representados de manera gráfica y confiablemente.



Figura 3-12. Materiales utilizados para el levantamiento topográfico. Fuente: Autor

La cantidad de los puntos de nivel fue de 83 con el fin de presentar de manera más real las diferencias de altura entre los puntos considerados en el levantamiento. Se inició por la parte superior izquierda del sitio y se avanzó de forma lateral ordenada para no dejar espacios grandes sin información que pudieran de alguna manera debilitar la calidad del levantamiento. Los datos han sido grabados en la memoria interna de la Estación Total utilizada. Los puntos, se encuentran relacionados en la tabla 3-6, siendo el primero, el punto de referencia de la estación. Los sitios se delimitaron con estacas que forman una superficie rectangular.



Figura 3-13. Estación topográfica y cadenero con prisma en el levantamiento.
Fuente: Autor

3.2.7.1 Ubicación.

El terreno está ubicado en el sector de Soceagro dentro del predio de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio campus Loma Linda por el ingreso de las escalas peatonales.

3.2.7.2 Área y perímetro del terreno

Área: 94.712 m².

Perímetro: 73.229 m.

3.2.7.3 Pendiente promedio:

Promedio de 30°

3.2.7.4 Descripción del terreno:

Presenta ondulaciones pequeñas ocasionadas por el paso de animales, presencia de formaciones rocosas de tamaño mediano y cobertura vegetal densa de especies pequeñas de plantas y pastos, no sembrados por el hombre.

3.2.7.5 Procesamiento de datos:

Una vez obtenido los datos procedemos a trabajar con los puntos a partir de sus coordenadas y descripción con la ayuda del croquis realizado para referenciarlos y desarrollar el plano perimétrico respectivo.

3.2.7.6 Modelación de resultados:

Una vez realizado el levantamiento y analizando los datos obtenidos, podemos percibir que es necesario realizar un modelado en AutoCAD Civil 3D del levantamiento topográfico en campo para evidenciar la forma de superficie donde se está realizando la siembra y visualizar los datos de forma del terreno.

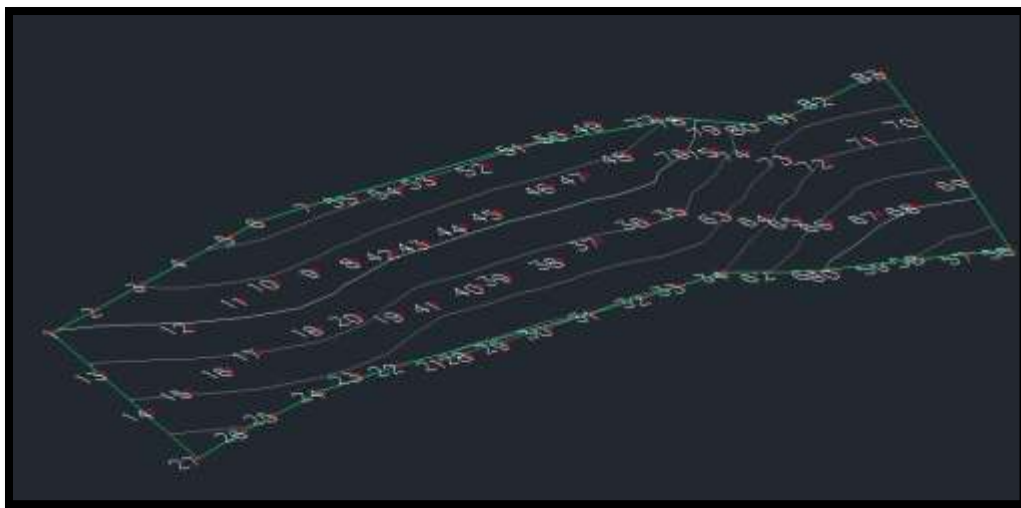


Figura 3-14. Modelación en CivilCAD, puntos topográficos del talud en estudio.

Fuente: Autor

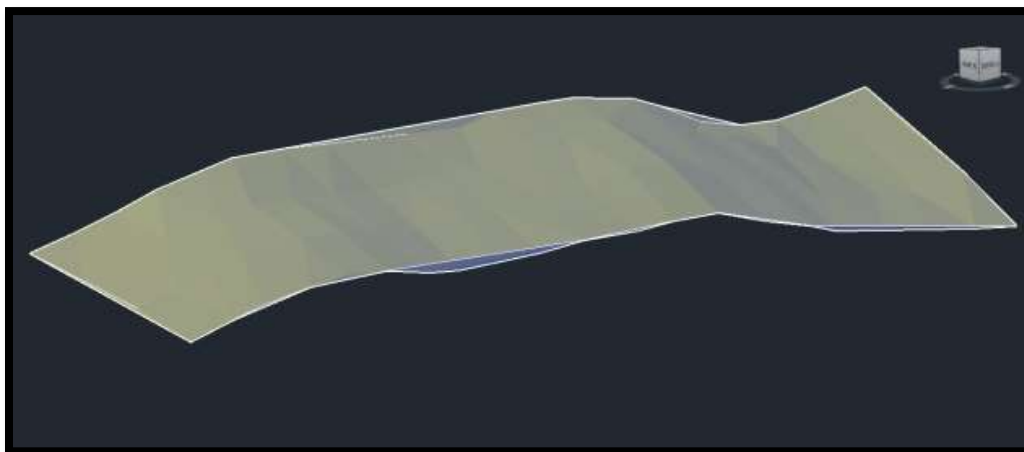


Figura 3-15. Modelación en CivilCAD, puntos topográficos del talud en estudio.
Fuente: Autor

3.2.8 Siembra de vetiver e inoculación con MA

Para el proceso de la siembra se tuvo en cuenta la cantidad de materia prima que se necesitaba. Se realizó un pedido de 1000 plántulas de Vetiver. Pero primero se debía realizar una división entre la zona que se iba a aplicar con Micorrizas Arbusculares y la zona donde quedaría sembrado directamente el Vetiver.

La primera zona de solo Vetiver se procedió a marcar los surcos a una distancia de 1 m cada uno, para un total de 5 surcos y se estableció una distancia entre plántulas de entre 15 a 20 cm. Con ayuda de herramienta ideal, se realizaron los surcos con una profundidad de 15 centímetros cada uno. Luego, se procedió a repartir y a colocar en el sitio de siembra cada uno de las plántulas para luego poner una capa de suelo encima de la raíz, teniendo en cuenta no tapar la parte superior de la planta para su normal desarrollo.



Figura 3-16. Adecuación de surcos para siembra. Fuente: Autor

Por otro lado, la siembra con Micorriza Arbuscular y el pasto Vetiver se procedió primero a realizar cada surco con una profundidad de 15 cm, pero esta vez aplicando una cantidad adecuada de Micorrizas Arbusculares, la dosificación óptima entregada por el vendedor, fue 500 a 600 kg por hectárea. La Micorriza se preparó mezclándose con abundante agua limpia y se aplicó antes de poner cada plántula en su lugar. Luego el sembrado se realizó con el mismo procedimiento que las plantas sin Vetiver. Para potenciar aún más el efecto de la Micorriza en la raíz del pasto, se realizó una adicción extra de Micorrizas haciendo un pequeño agujero encima de la raíz inyectándole un poco de la mezcla de Micorrizas y agua.



Figura 3-17. Siembra de las plántulas de Vetiver. Fuente: Autor

Para poder hacer una siembra adecuada del Vetiver hay que tener en cuenta las siguientes características, entregadas por el vendedor.

1. Dividir los tallos y recortarlos a 25 cm de largo.
2. Antes de la siembra, mantener los tallos en un lugar fresco y preferiblemente húmedo.
3. Previamente diseñar y marcar en el terreno las líneas de contorno por donde sembrará el Vetiver.
4. Hacer un pequeño surco siguiendo las líneas de contorno.
5. Realizar la siembra al comienzo de la temporada de lluvias para aumentar la posibilidad de sobrevivencia de las plantas.
6. Sembrar cada planta a una distancia equidistante no mayor de 15 cm.
7. La barrera necesitará poco mantenimiento.



Figura 3-18. Surcos después de la siembra. Fuente: Autor

3.2.8.1 Mantenimiento de cultivo y revisiones

Es una planta muy resistente y de fácil manejo, importante es revisar a los 30 días y hacer la reposición (resiembra) del material que falló. Es fundamental que la barrera quede completa y sea eficiente. Controlar malezas altas en los primeros 3 meses para que él se desarrolle y compita bien, luego de establecido él se defiende solo.

Podar a los 3 o 4 meses a una altura de 25 cm para estimular macollamiento, es decir formación de tallos. Luego con dos podas anuales es suficiente si se quiere que las barreras se vean paisajísticamente más agradables y homogéneas.

A los dos meses se hace una fertilización con un abono rico en fósforo a razón de 100 gr por cada 10 metros lineales de barrera viva.



Figura 3-19. Estado actual del talud con Vetiver y Micorrizas 4 meses después.

Fuente: Autor

3.2.9 Ensayos de Laboratorio

3.2.9.1 Granulometría

Su finalidad es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo, posible también su clasificación mediante sistemas como AASHTO o SUCS. El ensayo es importante ya que se realizará una clasificación para conocer las características físicas de los materiales presentes y tener más información del entorno donde se están desarrollando las raíces y los hongos micorrizadores.

Para obtener la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente. Los tamices a utilizar en el presente ensayo, de acuerdo a la Norma INV E – 123 (2013), son los siguientes:

Tabla 3-6. Lista de tamices con su abertura.

TAMIZ	ABERTURA (mm)
N°4	4.760
N°10	2.0
N°20	0.840
N°30	0.590
N°40	0.420
N°60	0.250
N°100	0.149
N°200	0.074

Fuente: Norma INV E – 123 (2013)

La recolección de muestras como ya se había mencionado, se obtuvieron en el apique de reconocimiento, donde hemos podido observar los diferentes tipos de

suelos existentes. La información de ubicación y formas en las que se realizó, se encuentran en este documento en la descripción etapas.

El material extraído se limpió, sin raíces, para luego ser llevado a laboratorio de suelos de la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio.

3.2.9.1.1 Análisis granulométrico por lavado

Primero se pesó el recipiente a utilizar, luego se agregó la muestra para ser pesada nuevamente y luego llevada al horno, por 24 horas. Se retira la muestra del horno y se deja enfriar al aire libre, luego se pesa la muestra para determinar el contenido de humedad del material, inmediatamente se procede a lavar la muestra, para lo que se necesita la malla N° 200.



Figura 3-20. Lavado de los finos. Fuente: Autor

Una vez lavado la muestra por la malla N° 200, el material retenido debe secarse en el horno por 24 horas. Pasado este tiempo, se extrae el material y se pesa para determinar el porcentaje de finos. De la muestra lavada ya extraída del horno, se pesó 500g para el tamizado.

Tabla 3-7. Datos iniciales del tamizado.

Peso total de la muestra (g)	886.6
peso inicial antes de secado (g)	1000
peso después de secado (g)	886.6
Peso lavado seco (g)	403.4
Peso de finos perdidos por lavado (g)	483.2
Porcentaje de perdida %	-0.113%

Fuente: Autor

El material se coloca en la parte superior de la serie de tamices, en este proceso se debe de tener cuidado en no perder el material, luego del tamizado se procede a pesar el material retenido en cada malla y se anotan los datos en la tabla de continuación:

Tabla 3-8. **Resultado del ensayo granulométrico**

		Nº. del Tamiz	Peso Retenido gr,	Peso Retenido gr, REAL	B %Pasante	% Mas Grueso	% Más Fino
GRAVA	FINA						
		3/8	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
		1/4	0.00	0.00	0.00		
		Nº 4	10.30	10.31	1.16	1.16	98.84
ARENA	GRUE	Nº 8					
		Nº 10	22.40	22.43	2.53	3.69	96.31
	MEDIA	Nº 16					
		Nº 20	23.80	23.83	2.69	6.38	93.62
		Nº 30					
		Nº 40	56.40	56.46	6.37	12.75	87.25
	FINA	Nº 50					
		Nº 60	90.50	90.60	10.22	22.97	77.03
		Nº 80					
		Nº 140	149.30	149.47	16.86	39.83	60.17
		Nº 200	39.00	39.04	4.40	44.23	55.77
		P Nº 200	493.9	494.46	55.77	100.00	0.00

Fuente: Autor

3.2.9.1.2 Curva Granulométrica

Con los datos obtenidos en el ensayo de granulometría, se construyó la siguiente gráfica:

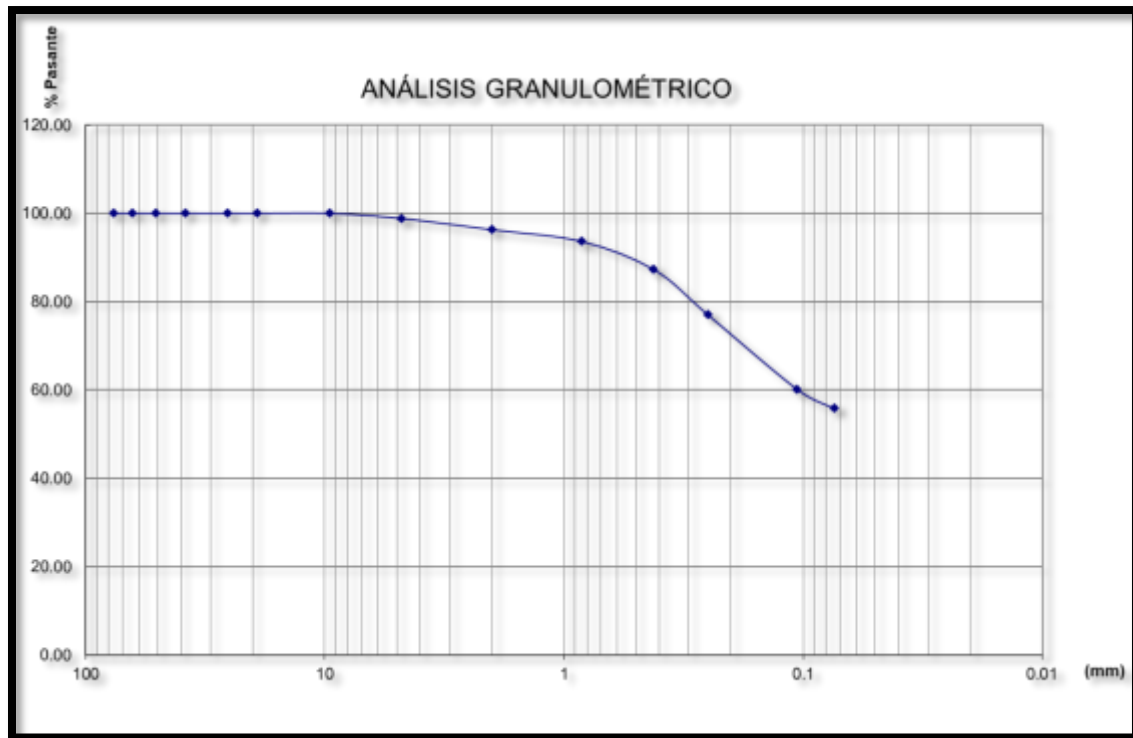


Figura 3-21. Curva Granulométrica. Fuente: Autor

3.2.9.2 Límites de Atterberg

El límite líquido (LL) se refiere a la humedad que debe tener el suelo cuando este se encuentra en la transición del estado semi-líquido a plástico. La principal característica de este estado es que tiene una resistencia al corte muy pequeño.



Figura 3-22. Preparación y ensayo de límite líquido. Fuente: Autor

Para obtener el valor del límite líquido de una muestra de suelo, se realiza el ensayo de Casagrande, el cual consiste en mezclar homogéneamente la muestra con agua destilada hasta lograr una humedad superior al límite líquido. Luego, se coloca la muestra de suelo húmedo en la máquina de Casagrande y se extiende. Después, con un ranurador se separa la muestra de suelo en dos mitades y finalmente se gira la manilla para dar golpes a la muestra. El ensayo se completa cuando la humedad del suelo sea tal, que se junten ambas mitades de la muestra en una longitud de $1/2''$. El ensayo se realiza tres veces, obteniendo en cada punto, el porcentaje de humedad de acuerdo al número de golpes. El valor de humedad correspondiente al límite líquido se habrá obtenido a los 25 golpes.

Por otro lado, el límite plástico (LP) es la transición entre el estado plástico y sólido. Se puede identificar cuando el contenido de humedad es tal que, si se amasan bastoncillos de un diámetro de 3 mm, estos se fracturan ante la pérdida de humedad.

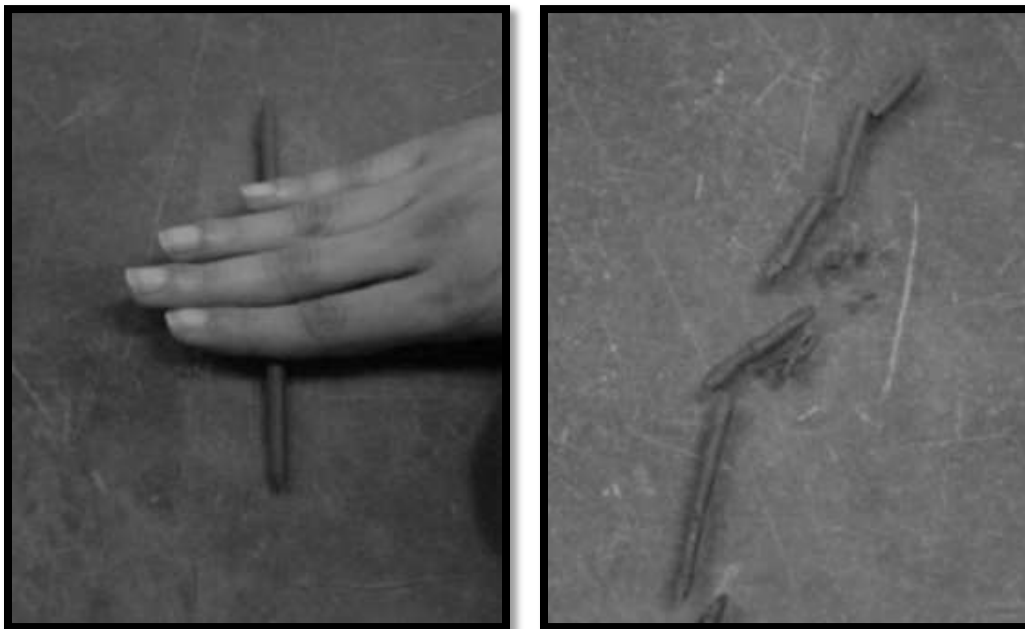


Figura 3-23. Realización del ensayo de límite plástico. Fuente: Autor

Por último, en este laboratorio también se calculará el índice de plasticidad, el cual se define como:

$$IP = LL - LP$$

Ecuación 3-1. Índice de Plasticidad

Es decir, el índice de plasticidad nos dice el rango de humedad en el cual el suelo tiene un comportamiento plástico.

3.2.9.2.1 Determinación del límite líquido

Como sabemos que el límite líquido w_L se obtiene a los 25 golpes de la máquina de Casagrande, se realizó un gráfico el cual muestra en el eje X el número de golpes a los cuales se juntaron ambas masas de suelo en $\frac{1}{2}$ " de longitud (en escala logarítmica), y en el eje Y, el porcentaje de humedad que tenía el suelo en ese momento.

Por lo tanto, se realizó una regresión lineal en este gráfico para los tres puntos obtenidos del experimento, y luego, para obtener el límite líquido se evaluó la recta obtenida con un número de golpes igual a 25.

Para obtener la humedad, se utilizó la siguiente expresión:

$$w = \frac{\text{Peso agua}}{\text{Peso suelo seco}} * 100$$

Ecuación 3-2. Contenido de humedad

Para obtener el peso del agua contenido en la muestra simplemente se pesó la cápsula con suelo húmedo (inmediatamente después del experimento para que la muestra no pierda agua), luego se llevó la capsula con el suelo húmedo al horno y se pesó nuevamente. Finalmente se restaron estas dos cantidades y se obtuvo el peso del agua. Es decir, el peso del agua se obtuvo con la siguiente expresión:

$$\text{Peso agua} = (\text{Peso suelo húmedo} + \text{cápsula}) - (\text{Peso suelo seco} + \text{cápsula})$$

Ecuación 3-3. Peso del agua

Para obtener el peso del suelo seco, se pesó cada una de las cápsulas, luego se llevaron las cápsulas con las muestras de suelo húmedo al horno y posteriormente se pesaron de nuevo. Por lo tanto, para obtener el peso del suelo seco simplemente se restaron ambas cantidades. El peso del suelo seco se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Peso suelo seco} = (\text{Peso suelo seco} + \text{cápsula}) - \text{Peso cápsula}$$

Ecuación 3-4. Peso del suelo seco.

En la tabla 3-10, se muestran los cálculos mencionados anteriormente.

Tabla 3-9. Resultados limite líquido

Determinación de Limite Liquido, zona de aplicación							
	Peso húmedo de muestra (g)	N° de Golpes	Peso seco total (g)	Peso de Recipiente (g)	Peso seco de Muestra (g)	Humedad (g)	Humedad (%)
muestra 1	21.4	30	109.4	91.9	17.5	3.9	22%
muestra 2	20.2	28	119.4	102.9	16.5	3.7	22%
muestra 3	23.2	20	107.7	89	18.7	4.5	24%
		25				LL	23%

Fuente: Autor

El gráfico mencionado anteriormente junto con la regresión lineal se muestra a continuación:

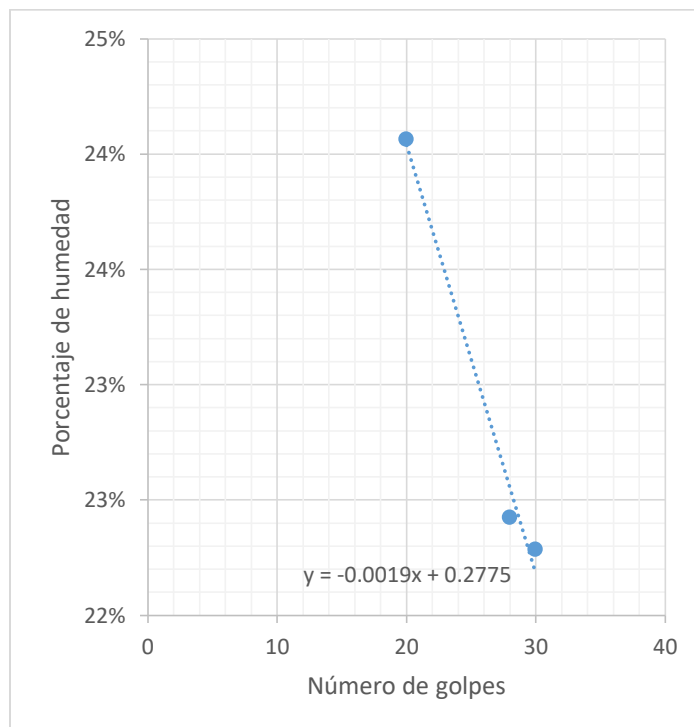


Figura 3-24. Modelo de regresión para límite líquido. Fuente: Autor

La ecuación de la recta obtenida de la regresión lineal es: $y = -0.0019x + 0.2775$

Por lo tanto, para obtener el límite líquido basta evaluar esta recta para $x = 25$, obteniendo:

$$LL = 23 \%$$

3.2.9.2.2 Determinación del límite plástico

Para la determinación del límite plástico es necesario tomar una muestra de la mezcla de suelo y agua, en específico una muestra de la mezcla resultante del ensayo de determinación del límite líquido. Tal muestra se amasa y se hacen tubos, de un diámetro cercano a los 3mm sobre una placa de vidrio.

Tabla 3-10. Resultados ensayo límite plástico.

Determinación del Limite Plástico, zona de aplicación						
	Peso húmedo total (g)	Peso seco total (g)	Peso de Recipiente (g)	Peso seco de Muestra (g)	Humedad (g)	Limite Plástico
Muestra 1	25.2	24.5	20.3	4.2	0.7	17%
Muestra 2	25	24.3	20	4.3	0.7	16%
					LP prom	16%

Fuente: Autor

Tabla 3-11. Resumen de límites de Atterberg.

Índice de plasticidad	
LL	23%
LP	16%
IP	7%

Fuente: Autor

Para ampliar esta información véase el Anexo D.

Una vez realizados los ensayos de granulometría y límites de Atterberg, se procede a clasificar en suelo, por medio de la carta de Casagrande, para suelos de grano fino y suelos orgánicos, con la nomenclatura del sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS).

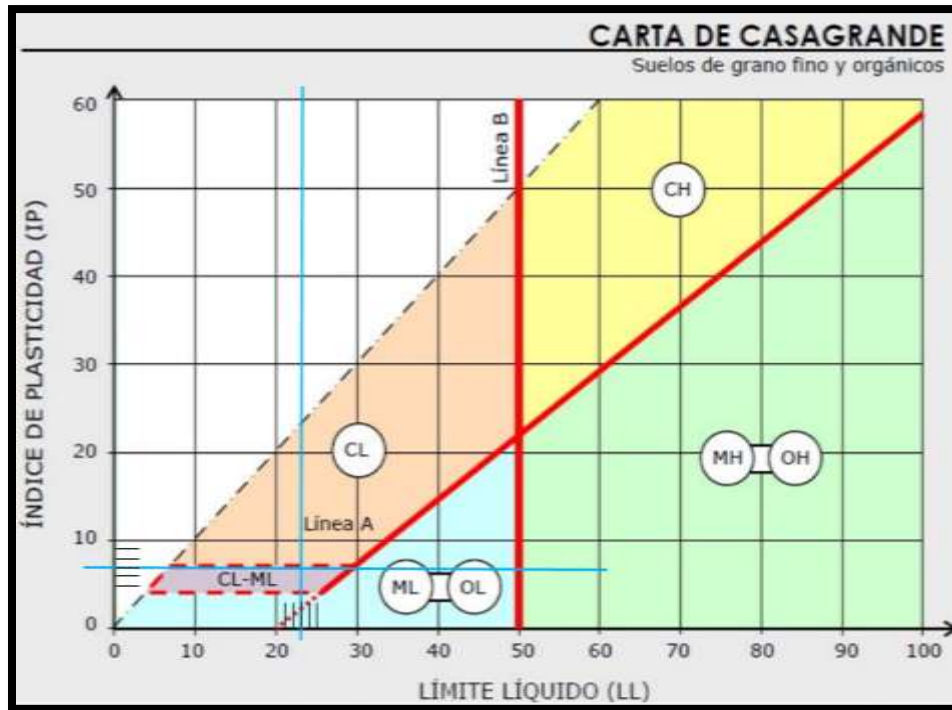


Figura 3-25. Ubicación del suelo dentro de la carta de plasticidad de Casagrande.
Fuente: Autor

El resultado obtenido, es un suelo Arcillo-limoso de baja plasticidad.

3.2.9.3 Resistencia al corte directo.

Para la realización de esta investigación se decidió trabajar con ensayos de corte directo consolidado drenado, teniendo otras investigaciones referentes importantes [5]. Sin embargo, para las aplicaciones de control de erosión y protección de taludes. Los suelos no deberían presentar altos niveles de consolidación. Por otro lado, dadas las condiciones de intensas precipitaciones y la vulnerabilidad del talud de sufrir saturación, generar erosión y una posible desestabilidad en la masa de suelo, se decidió realizar ensayos drenados.

Dado el tipo de suelo arcilloso, se escoge una velocidad de corte de 3 milímetros por minuto que le permite al suelo drenar el agua, mantener la velocidad constante para todas las muestras y determinar el aumento de la resistencia que generan las raíces.

Con base en la teoría sobre la ecuación de Mohr – Coulomb, para determinar los esfuerzos cortantes en la estructura del suelo y determinar si las raíces colonizadas con Vetiver favorecen en mejor medida a la estabilización del talud, se ha planteado realizar, de acuerdo con la norma INVÍAS I.N.V. E-154, el ensayo de corte directo, con 3 especies por cada condición en que se encuentra el talud, es decir con y sin Micorrizas.



Figura 3-26. Equipo de corte directo, facilitado por la Universidad Cooperativa de Colombia. Fuente: Autor

Los resultados obtenidos en este ensayo, se relacionan en las siguientes tablas, para ver más detalles, dirigirse al Anexo C.

Primero se han realizado los ensayos de corte directo, con tres tipos de carga normal diferente, en los especímenes de vetiver con presencia de Micorrizas Arbusculares.

Tabla 3-12. Resumen de resultados de corte directo, Vetiver con Micorrizas.

Carga Kg	Esfuerzo Normal kg/cm ²	Esfuerzo Cortante kg/cm ²
60	2.960	1.658
40	1.974	1.123
20	0.987	0.617
Angulo de fricción interna (°)		27.80

Fuente: Autor

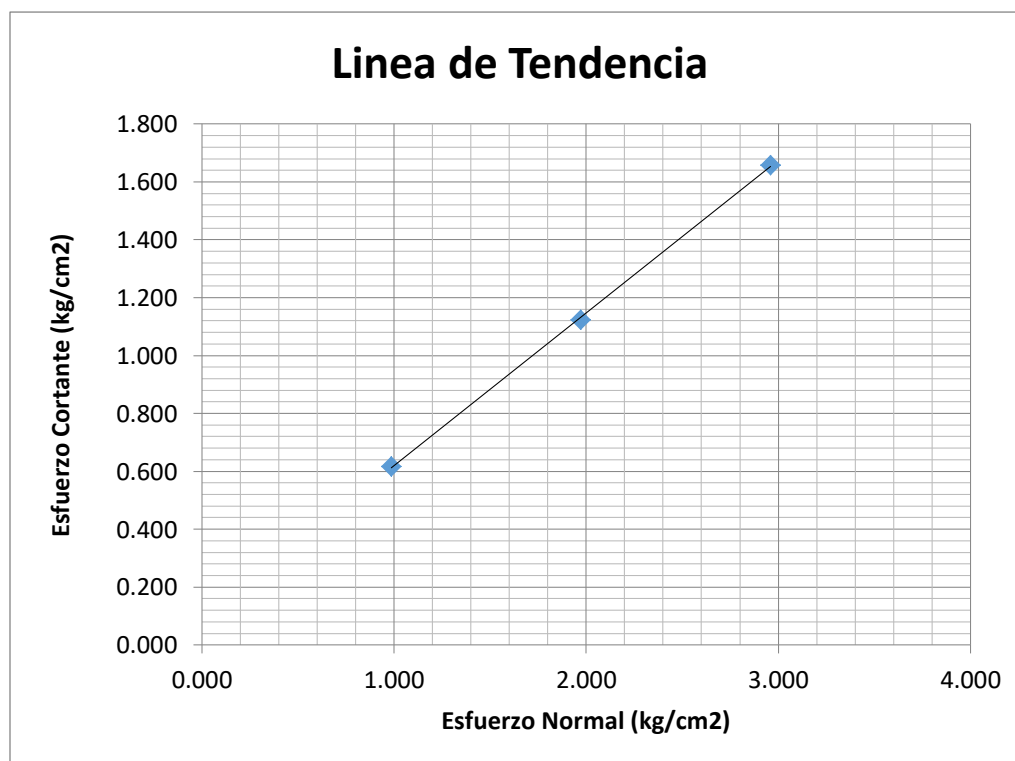


Figura 3-27. Línea de tendencia que describe la envolvente de falla, con Micorrizas. Fuente: Autor

Posteriormente se han realizado los ensayos de corte directo, para tres tipos de carga normal diferente, en los especímenes de vetiver, esa vez, sin presencia de Micorrizas Arbusculares.

Tabla 3-13. Resumen de resultados de corte directo, Vetiver sin Micorrizas.

Carga Kg	Esfuerzo Normal kg/cm2	Esfuerzo Cortante kg/cm2
60	2.960	1.599
40	1.974	1.031
20	0.987	0.594
Angulo de fricción interna (°)		26.98

Fuente: Autor

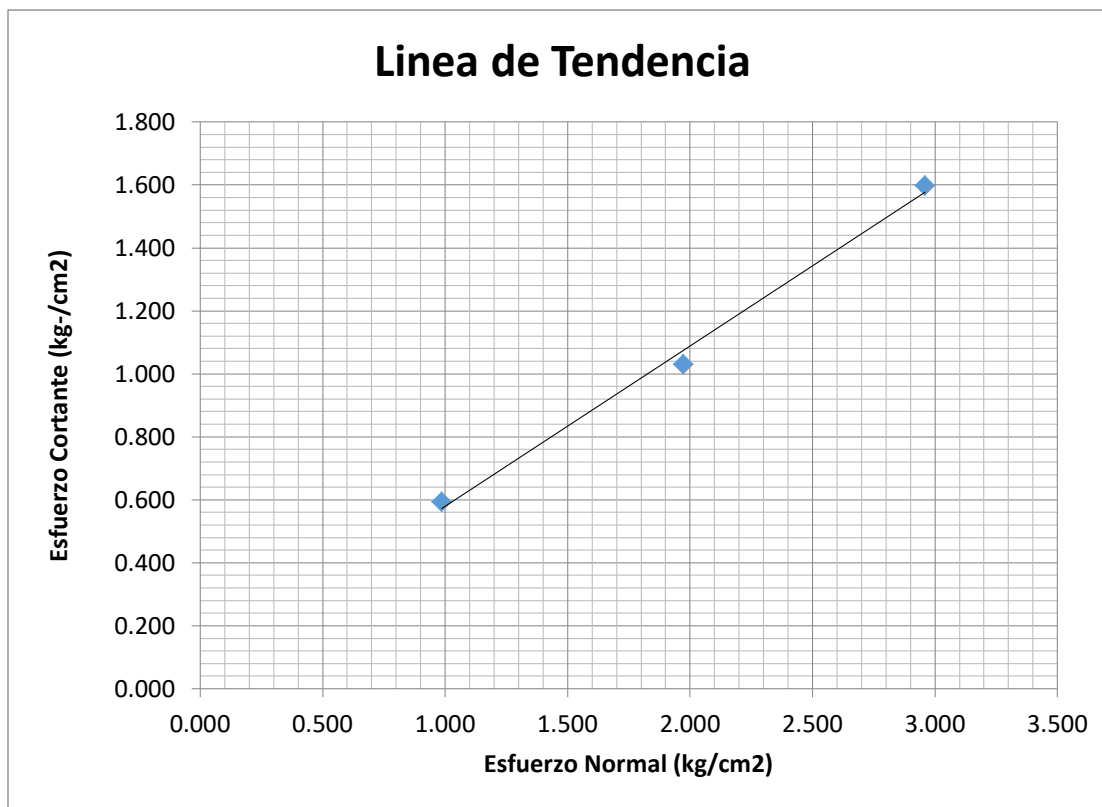


Figura 3-28. Línea de tendencia que describe la envolvente de falla, sin Micorrizas. Fuente: Autor

Con los resultados obtenidos directamente del ensayo de corte directo, y con la resistencia al cortante, se procede a trazar las gráficas de esfuerzo cortante contra deformación, en cada una de las condiciones, con Micorrizas y sin Micorrizas, así:

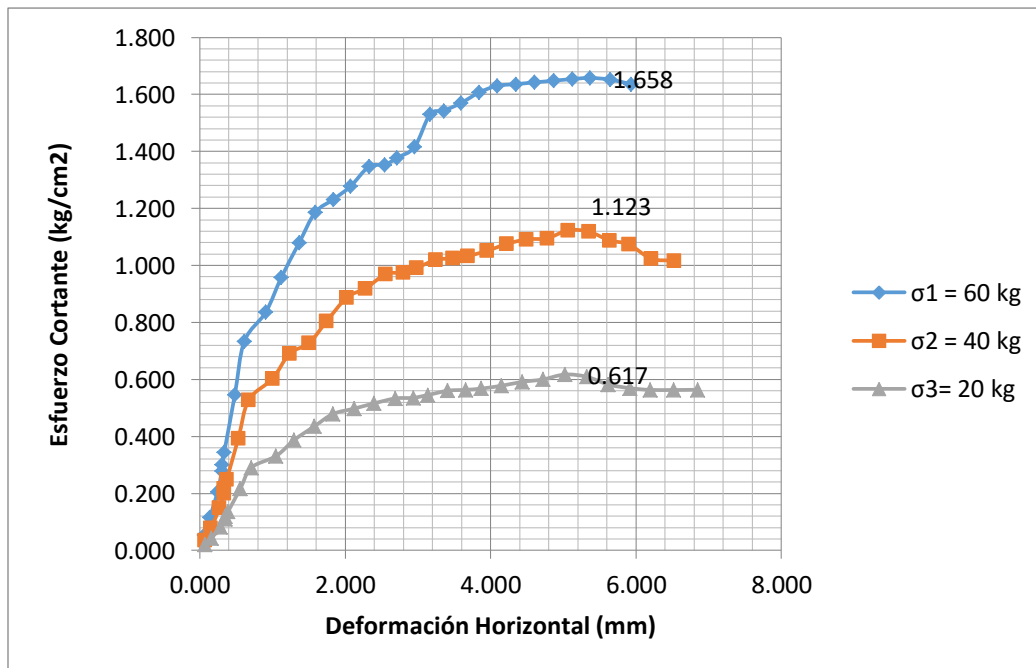


Figura 3-29. Curva de deformación contra esfuerzo cortante, con Micorrizas.
Fuente: Autor

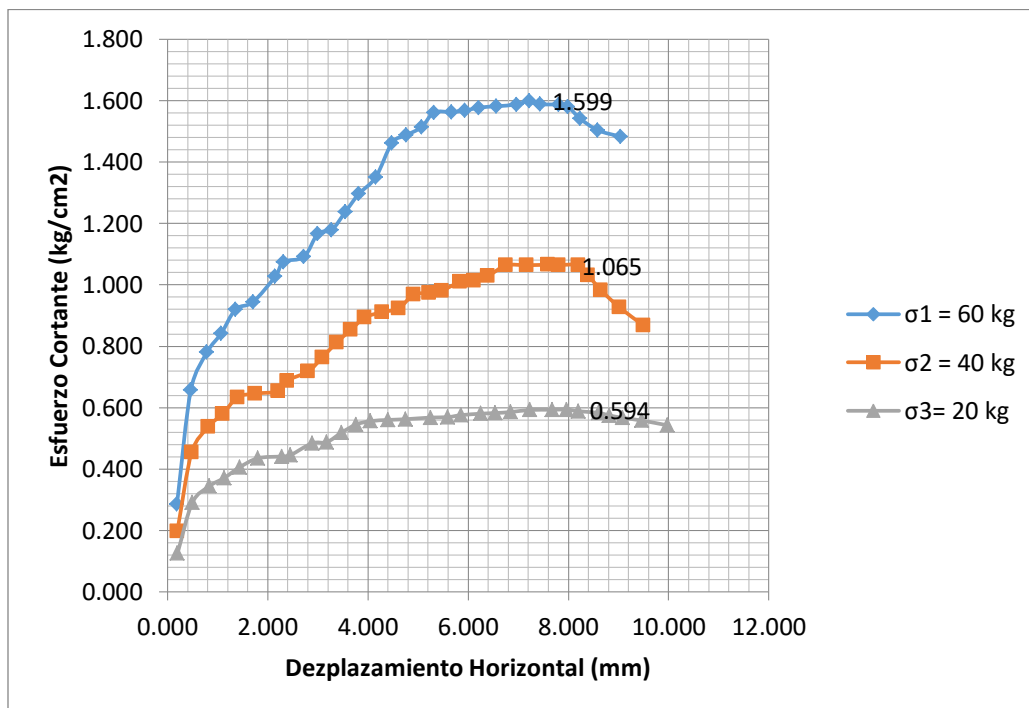


Figura 3-30. Curva de deformación contra esfuerzo cortante sin Micorrizas.
Fuente: Autor

A continuación se evidencia el proceso como se realizó la toma de la muestra inalterada, en cada uno de los especímenes, para someterlos al corte directo y su posterior resultado.



Figura 3-31. Preparación de muestra y resultado del corte directo. Fuente: Autor

3.2.10 Análisis de las plántulas en campo.

A modo de caracterización cualitativa y con el propósito de evidenciar la eficiencia de los hongos formadores de Micorrizas arbusculares, para alterar y potenciar el crecimiento de la raíz del pasto Vetiver, se han destinado ejemplares de los especímenes del talud en cada condición para realizar la medición de la longitud radical, diferenciando y detallando las características de cada caso, por observación directa.

La primera evaluación de la alteración de la raíz se efectuó a los dos meses después de sembrada la planta y los resultados se evidencian en la siguiente ilustración.



Figura 3-32. Comparación de la afectación de la Micorriza sobre el vetiver a los dos meses. Fuente: Autor

A la izquierda el Vetiver inoculado con Micorrizas arbusculares, a la izquierda el Vetiver sin alteración. Ambos con dos meses de sembrados. El Vetiver con Micorrizas presenta raíces principales más largas y en mayor cantidad, contando con una longitud máxima de raíz de 10 cm. Por otro lado, el Vetiver sin Micorrizas, presenta pocas raíces largas y de longitud máxima de 8 cm.

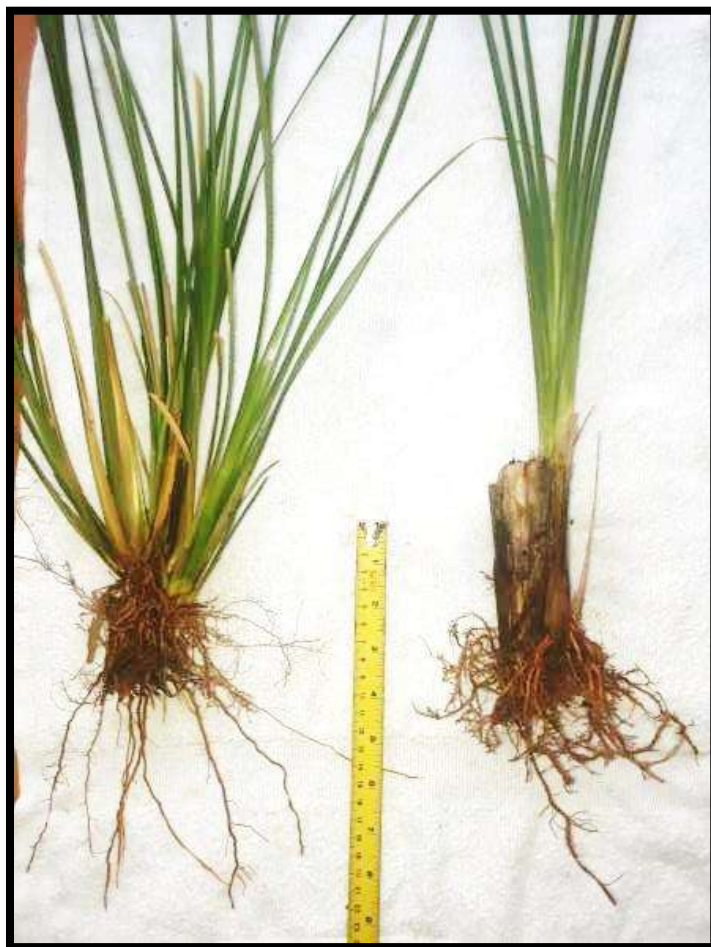


Figura 3-33. Comparación de la afectación de la Micorriza sobre el vetiver a los tres meses. Fuente: Autor

Luego de tres meses, a la izquierda el Vetiver inoculado con Micorrizas arbusculares, a la izquierda el Vetiver sin alteración. Nuevamente, el Vetiver con Micorrizas presenta raíces principales más largas y en mayor cantidad, contando con una longitud máxima de raíz de 18,5 cm, mientras que el Vetiver sin Micorrizas, presenta pocas raíces largas y de longitud máxima de 16,5 cm.

El último periodo de evaluación se estableció, cuando el pasto micorrizado tuvo una edad de cuatro meses. Cuando se hizo en campo la caracterización de las muestras de pasto, en las dos condiciones, se obtuvo resultados cualitativos considerables. A continuación se ilustra el resultado de la micorriza sobre la raíz del Vetiver.



Figura 3-34. Raíz de Vetiver en presencia de Micorrizas, cuatro meses después.
Fuente: Autor

El crecimiento de la raíz en cuanto a longitud se hace notorio. Sin embargo tanto el área de cobertura de la raíz, así como el volumen de suelo afectado por la misma, aumentaron a simple vista, por lo menos dos veces, en comparación con las muestras extraídas un mes atrás.

Respecto a la micorrización directa de la planta, como se aprecia a continuación, se puede decir que las hifas producidas por la acción del hongo, hacen que el Vetiver presente, para el volumen de influencia, una densificación mayor en la cantidad de raíces de diversos tamaños. Asimismo, es evidente, como en cuanto a estructura del suelo se presentan mejoras, al ver claramente los terrones que se forman gracias al anclaje de las raíces y a la actividad cementante producida por el hongo.



Figura 3-35. Muestra de la densidad de la raíz del Vetiver con Micorrizas. Fuente: Autor

Comparativamente se presentan los resultados cualitativos de las muestras sin presencia de Micorrizas, en las cuales, aunque también se evidencian importantes características en cuanto a longitud de raíces, área y volumen de influencia, se puede decir que, en menor cantidad respecto al Vetiver micorrizado. Las ilustraciones siguientes son prueba de ello.



Figura 3-36. Raíz de Vetiver sin presencia de Micorrizas, cuatro meses después.
Fuente: Autor

Finalmente se presenta la comparación cualitativa entre las raíces del Vetiver con y sin micorrizas respectivamente.



Figura 3-37. Raíces del pasto vetiver, a la izquierda con Micorrizas, a la derecha sin Micorrizas. Fuente: Autor

3.2.11 Favorecimiento contra la erosión

Al finalizar el periodo de prueba establecido para culminar la primera etapa de la investigación, se tiene tres áreas en diferentes condiciones de cobertura pertenecientes al mismo talud, dos con Vetiver, de las cuales una contó con

Micorrizas mientras la otra no, y la tercera sin ninguna planta, con el suelo expuesto a los agentes de intemperismo.



Figura 3-38. Parcelas de Vetiver en diferentes condiciones. Fuente: Autor

Por observación directa, es posible identificar que en las dos áreas donde se tenía pasto Vetiver, sin tener en cuenta la presencia de Micorrizas, el suelo se mantuvo sin señales de erosión visible, mantuvo su altura y aparentemente su volumen; mientras, el área desprotegida, dejó notar a simple vista una pequeña reducción de volumen en pequeñas zonas.

Para ver un ejemplo claro de los beneficios directos del pasto Vetiver contra la erosión, podemos observar que los arboles sin recubrimiento vegetal no pueden realizar esta labor por si solos porque sus raíces son demasiado largas y gruesas para evitar que los pequeños granos de suelo sean arrastrados por la escorrentía superficial generados por lluvia o viento. Por este motivo la plantación de gramíneas con raíces reduce la velocidad del agua disminuyendo así potencia y terminando con el suelo transportado en las barreras creadas. [18]

Según el Banco Mundial *“Cuando el escurrimiento llega hasta los cercos vegetales, se hace más lento, se esparce, se desprende de su carga de limo y fluye a través de las hileras de cercos; entretanto, gran parte del agua penetra en la tierra. No hay pérdida de suelo y tampoco hay pérdida de agua debido a la concentración del escurrimiento en zonas determinadas.”* [18]

Las hojas del pasto Vetiver, cuando este se encuentra en un desarrollo entre cuatro meses y un año de cultivo, disminuye la energía de impacto de las gotas de lluvia y cohibe el paso de las corrientes de viento muy cerca de la superficie. La vegetación brinda un amarre superficial y profundo dependiendo del estado en su ciclo de desarrollo, permitiendo diferentes tipos de restitución de minerales en el suelo por procesos orgánicos.



Figura 3-39. Amarre del Vetiver con el suelo superficial. Fuente: Autor

3.3 CONCLUSIÓN DEL CAPITULO

Teniendo en cuenta las condiciones climáticas de la zona de estudio, que se caracterizan por ser cambiantes y agresivas, pues dependiendo de la época del año, brinda largos periodos de sequía, o por el contrario, altas intensidades de precipitación, o lo que es peor, la presencia de ambos fenómenos en cortos periodos de tiempo. Se suma a esto la tenencia de un tipo de suelo Arcillo – limoso de baja plasticidad, el cual, aunque no impide el desarrollo de vegetación, tampoco brinda las mejores cualidades para esto. Entonces, se puede decir que el paso vetiver se encuentra en situaciones semi – adversas. Aun así, demuestra su gran virtud de adaptabilidad, lo cual, se evidencio en mayor medida, gracias a las Micorrizas arbusculares.

En cuanto al proceso metodológico para comparar el efecto de la Micorriza Arbuscular en la raíz del pacto vetiver, dejó ver resultados motivadores. El hecho de la ligera pero considerable mejora en las propiedades físicas de la planta, se cree, es debido al corto periodo de desarrollo de la planta inoculada con el hongo y da para suponer que se comportará como un modelo de beneficio exponencial que irá creciendo con el tiempo.

Esta mejora física en las condiciones físicas de la planta, demostró también, aunque en baja medida, que el potenciamiento de la raíz del Vetiver con el hongo,

aporta en la alteración positiva de las propiedades mecánicas del suelo, mejorando la resistencia al corte que es un parámetro fundamental en cuanto a control de erosión de taludes. Se tuvieron en cuenta también otros factores, no despreciables, como aumento característico en el ángulo de fricción y fortalecimiento de la estructura del suelo, por la cohesión causada tanto por el anclaje de la raíz, como por el efecto cementante de la Micorriza Arbuscular.

4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con respecto al análisis y discusión de los resultados encontrados en el trabajo de grado, con relación a los objetivos del proyecto, se puede decir que:

El área de estudio identificada y seleccionada para aplicar la siembra de las especies de Vetiver micorrizado, fue apropiada, dadas sus condiciones de vulnerabilidad ante la erosión por agentes externos, y por su capacidad para permitir el crecimiento del pasto Vetiver. Lo que permite decir que efectivamente el proyecto, podría ser aplicado, por lo menos, en la denominada zona Piedemonte llanero. No descartando la posibilidad de su expansión a otras zonas, con características diferentes.

Mediante sondeos técnicos y ensayos de laboratorio, se ha clasificado el suelo, el cual se ha caracterizado por altos contenidos de material fino, y por tener baja plasticidad, es decir un CL-ML según el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS. Por lo tanto, cualquier proyecto del mismo tipo en este tipo de suelo, debe tener comportamiento similar.

Una vez realizados los ensayos de laboratorio enfocados a evaluar específicamente las propiedades mecánicas del suelo, se puede decir que los resultados, han sido satisfactorios, pues tanto el corte directo del suelo, como el ángulo de fricción, se vieron, aunque en baja medida, potenciados por la presencia de Micorrizas Arbusculares.

Tabla 4-1. Comparación de ángulos de fricción

Angulo de fricción con Micorrizas (°)	27.80
Angulo de fricción interna sin Micorrizas (°)	26.98

Fuente: Autor

Esta mejora del 3% en el ángulo de fricción, en un periodo de cuatro meses, se considera importante si se tiene en cuenta que para este tiempo las raíces solo tenían una longitud cercana a los 20 cm, y que se tiene un crecimiento esperado de la raíz de entre 3 a 5 m.

En cuanto a la aplicación de las Micorrizas Arbusculares y su impacto dentro del desarrollo del pasto y por consiguiente brindando mejoría en el control de la erosión. Se realiza una caracterización donde se tienen 4 aspectos importantes dentro de la planta en comparación con las plantas que no son intervenidas con los hongos micorrizadores, estos aspectos son: cantidad de hojas desarrolladas, número y aspecto de raíces de la planta, macollamiento o número de tallos y clasificación visual por medio de cantidad de pelos secundarios presentes en las raíces.

La toma de muestras se realizó de la siguiente manera, tomando dos grupos de pasto Vetiver dividido en 10 plántulas colonizadas con Micorrizas y 10 plántulas sin ninguna alteración Biológica.

Tabla 4-2. Muestras de cada caso a analizar.

VETIVER		
	Muestra 1	Muestra 2
	Con Micorrizas	Sin Micorrizas
N° de Muestras	10	10

Fuente: Autor

Cabe aclarar que las parcelas construidas para la realización de la investigación tienen una población de 350 plántulas aproximadamente por parcela.

Tabla 4-3. Conteo de las hojas del Vetiver

HOJAS DEL VETIVER (N°)		
N° de Muestra	Con Micorrizas	Sin Micorrizas
1	58	47
2	65	53
3	48	54
4	57	59
5	62	49
6	63	44
7	54	58
8	47	52
9	59	57
10	51	43

Fuente: Autor

En este caso, se debe tener en cuenta que el desarrollo de las planta con Micorrizas, visualmente es evidente por el color de sus hojas y la cantidad respecto al Vetiver sin Micorrizas. Dando los siguientes resultados de comparación.

El promedio de hojas en la planta intervenida con Micorrizas es de 56.4 hojas y el del pasto aplicado directamente es de 51.6 hojas, dando como resultado en el número de cantidad de hojas desarrolladas una mejora del 8.5%.

Uno de los parámetros más importante a ser analizados son las longitudes de los raíces, por lo que se optó por tomar la raíz más larga en promedio que se encontrara en cada espécimen. Para relacionar los resultados tenemos la siguiente tabla:

Tabla 4-4. Longitud radicular del Vetiver.

LONGITUD RADICULAR DEL VETIVER (cm)		
N° de Muestra	Con Micorrizas	Sin Micorrizas
1	19	16
2	23	22
3	21	24
4	19	17
5	19	17
6	20	17
7	17	21
8	26	19
9	24	18
10	18	21

Fuente: Autor

Las plantas con Micorrizas presentaron una mejor distribución dentro del terreno y una mayor profundidad. Por otro lado, el patrón de engrosamiento era mucho mayor frente a las plantas que no habían sido alteradas. Como promedio, la longitud de la raíces con Micorrizas es de 20.6 cm y para el pasto Vetiver normal es de 19.2, lo que representa una mejora en la evolución de las condiciones radiculares de 6.8% en comparación.

Como un aspecto adicional de información de desarrollo de la planta, se encuentran los pelos secundarios que son los encargados de absorber nutrientes en el subsuelo, se realizó una clasificación cualitativa de la presencia de estos:

Tabla 4-5. Caracterización de raíces secundarias del Vetiver.

RAÍCES SECUNDARIAS DEL VETIVER (Población)		
N° de Muestra	Con Micorrizas	Sin Micorrizas
1	Buena	Regular
2	Buena	Buena
3	Buena	Regular
4	Regular	Buena
5	Regular	Regular
6	Buena	Buena
7	Buena	Regular
8	Regular	Buena
9	Buena	Buena
10	Buena	Buena

Fuente: Autor

Esto indica, cualitativamente, que el pasto que ha sido colonizado por el hongo formador de Micorrizas, no solo tiene raíz más larga y fuerte, sino también más densa y abarca más volumen dentro del suelo, favoreciendo la estructura del mismo.

Otro factor considerado, es la cantidad presente de tallos desarrollados en cada planta tomo un rumbo importante dentro del análisis de los beneficios de la Micorrizas para evitar la erosión ya que según referentes teóricos [18], entre más tallos tiene una planta, mayor es el rango de protección del suelo, pues disminuye la velocidad e impacto con que cae el agua de lluvia directamente en la superficie. Debido a esto, se realizó un conteo en los especímenes extraídos y se recopiló la siguiente información:

Tabla 4-6. Numero de tallos (macollamiento) del Vetiver.

MACOLLAMIENTO DEL VETIVER (N° TALLOS)		
N° de Muestra	Con Micorrizas	Sin Micorrizas
1	9	8
2	10	7
3	9	6
4	8	7
5	9	6
6	11	8
7	9	6
8	9	7
9	7	5
10	9	6

Fuente: Autor

El promedio de tallos en las plantas con Micorrizas es de 9 tallos por planta mientras que en el caso sin Micorrizas es de 6.6, que equivale a una mejoría aparente de 26.6%.

Por lo anterior, nos es posible determinar que técnicamente, el control de la erosión en taludes, mediante la implementación de pasto Vetiver, mediante el uso de Micorrizas Arbusculares es considerablemente factible. Ahora bien, en cuanto al aspecto ambiental y económico, la técnica también tiene sus ventajas. Ambientalmente, un talud recubierto con pasto, capta más CO₂, que uno recubierto con concreto. Pero cuando se habla de Vetiver en específico hay que tener en cuenta que, según referentes, este absorbe CO₂ en mayor cantidad que otros pastos.

En lo que a economía se refiere, es sencillo argumentar que la estabilización de un talud con bio-ingeniería es más barato que hacerlo con técnicas convencionales, sin embargo es apresurado, pues para los resultados que ha

arrojado el proyecto, no es prudente, por lo menos aún, comparar la técnica de Vetiver micorriazado con las demás, puesto que hasta ahora se encuentra en su etapa de desarrollo.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La implementación de Vetiver es un camino viable y rentable económicamente para el control de la erosión en taludes y suelos de gran parte del Piedemonte, previniendo así la vulnerabilidad.

Se encontró información verás de que el vetiver puede contrarrestar los procesos de erosión y esta investigación adiciono que con ayuda de las Micorrizas Arbusculares se potencializa el crecimiento y el número de sus características físicas. De igual manera el departamento del Meta es una potencia agrícola del país y se podrían realizar estudios basados en la aplicación de pasto y Micorrizas para prevenir la pérdida de suelos por esta actividad.

La metodología presento una aumento en las propiedades del pasto Vetiver positivas pero aun no considerables para plantar un cambio realmente significativo esta por la imposibilidad de extender la investigación y debido al tiempo de desarrollo del pasto, pero se invita a los investigadores de la universidad Santo Tomas a profundizar más en el tema y culminar el análisis con un aporte excelente a la ingeniería civil y a la sociedad Metense en general.

Esta investigación sirve de punto de referencia a la población para la generación nuevas tecnologías en la zona, así como la culturización de uso de métodos naturales para la conservación y tratamiento de los suelos.

Al analizar la erosión en los suelos y para contar con resultados más acertado, se realizó un estudio de corte directo para determinar los beneficios de la micorriza en la raíz de la planta, los cuales dieron como resultado un aumento del 4.7% de resistencia al corte con respecto a una alianza del pasto pero sin micorrizas.

Se observa que el vetiver tiene una tendencia favorable de mejorar algunas propiedades físicas del suelo al compararse con las condiciones iniciales. Se debe a su sistema radicular denso, masivo, bien estructurado el cual provee un ambiente que mejora la estructura del suelo, y que a su vez estimula la actividad de los organismos del suelo, especialmente favoreciendo un alto desarrollo de micorrizas.

Se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y las variables número de tallos o macolla. Estas variables aumentaron significativamente en la medida que se disminuyó la aplicación de Micorrizas Arbusculares.

El Vetiver con Micorrizas es sencillo, barato, de fácil aplicación, efectividad, larga duración. También es de bajo coste de desarrollo y mantenimiento, y de rápida aplicación y poco impacto ambiental, sobre todo si se compara con los sistemas tradicionales de estructuras artificiales.

5.2 RECOMENDACIONES

Sabiendo que el objeto de la investigación se cumplió, pues se demostró la eficiencia de la Micorriza Arbuscular para potenciar el pasto Vetiver y a su vez controlar la erosión en los taludes, es necesario expandir su análisis en diversas condiciones.

De esta manera, se plantea, que para estudios posteriores, se realice la toma de los ensayos, cuando la longitud de la raíz haya alcanzado su máximo, así como efectuarlos por medio de un método más preciso cómo lo es el ensayo de Corte Triaxial. Determinando si la longitud total de raíz es lo suficientemente fuerte para controlar el plano de falla total de un talud.

Se hace necesaria la experimentación en taludes con diferentes tipos de suelos y con diferentes ángulos de inclinación, así como con diferentes tipos de pasto, lo cual requiere una caracterización de la afectación de la micorriza en cada especie.

6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Martínez, «Mezclas ecológicas para el control de la erosión y estabilidad de taludes,» *Facultad de Ingeniería*, vol. 19, nº 28, 36, 2010. Disponible en: <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/1395/1390>
- [2] Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales, «Estaciones meteorológicas: SENA, UNILLANOS, IDEAM V/CIO.,» IDEAM, Villavicencio, 2018. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>
- [3] P. D. V. Ibarra, «Estabilidad de Taludes con Anclas,» Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F., 2015. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/8389/Tesis.pdf.pdf?sequence=2>
- [4] G. D. E. Carlos Enrique Escobar Potes, «Geotecnia para el trópico Andino,» Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2017. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/53560/75/geotecniaparaeltropicoandino.pdf>
- [5] J. V. A. G. Jessika Magreth Herrera Passos, «Evaluación de parámetros de resistencia al corte en suelos de ladera cubiertos con Vetiver,» *Revista de la escuela colombiana de ingeniería*, nº 108, pp. pp. 37- 43, 2017. Disponible en: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/jspui/bitstream/001/887/1/Evaluaci%C3%B3n%20de%20par%C3%A1metros%20de%20resistencia%20al%20corte%20en%20suelos%20de%20ladera%20cubiertos%20con%20vetiver.pdf>
- [6] S. D. Jaime, «Vegetación y Bio ingeniería,» de *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*, Bucaramanga, Ingeniería de Suelos Ltda., 1998, pp. 275-302. Disponible en: <http://www.erosion.com.co/deslizamientos-y-estabilidad-de-taludes-en-zonas-tropicales.html>
- [7] M. Agudelo Becerra and F. Casierra-Posada, «Efecto de la Micorriza y gallinaza sobre la producción y la calidad de Cebolla Cabezona», 1st ed. Tunja, 2004. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/215768216_Efecto_de_la_micorriza_y_gallinaza_sobre_la_produccion_y_la_calidad_de_cebolla_cabezona_Allium_cep%C3%A1_L_'Yellow_Granex
- [8] Jeffries P., Barea JM (2001) «Mycorrhiza Arbuscular - Un Componente Clave De Los Ecosistemas Sostenibles Planta-Suelo». En: Hock B. (eds) *Fungal Associations. The Mycota* (Un tratado integral sobre hongos como sistemas experimentales para investigación básica y aplicada), vol. 9. Springer, Berlín, Heidelberg. Disponible en: [https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45\)\)/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=41747](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqyw2orz553k1w0r45))/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=41747)
- [9] Solís, C. R. (2002). «La Biofertilización - una alternativa económica para la nutrición de la soya en el Piedemonte llanero». Corpoica, Programa de recursos biofísicos, 11 - 14. Disponible en: <http://bibliotecadigital.agronet.gov.co/bitstream/11348/4141/2/103.pdf>
- [10] M. Cano, «INTERACCIÓN DE MICROORGANISMOS BENÉFICOS EN PLANTAS: Micorrizas, *Trichoderma spp.* y *Pseudomonas spp.* UNA REVISIÓN». 2011. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S012342262011000200003&script=sci_abstract&lng=es
- [11] "Vetiver System for Erosion and Sediment Control, and Stabilization of Steep Slopes", The Vetiver Network International, Vietnam, 2012. Disponible en: https://www.vetiver.org/AUS_eros-sedim%20cont-o.pdf

- [12] E. P. d. Medellín, «Norma de construcción y protección de Taludes,» EPM, Medellín, 2018. Disponible en: https://www.epm.com.co/site/Portals/3/documentos/Aguas/NC_MN_OC08_06_Proteccion_de_taludes.pdf?ver=2019-01-28-141741-250
- [13] Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la meseta de Bucaramanga, «Normas técnicas para el control de erosión y para la realización de estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos, resolución número 000356,» CDMB, Bucaramanga, 2005. Disponible en: <http://www.cdmb.gov.co/web/ciudadano/centro-de-descargas/7-normas-geotecnicas-control-erosion-1/file>
- [14] M. G.-C. Y. S. W. M.C.A.González Chávez, «Hongos micorrícicos arbusculares en la agregación del suelo y su estabilidad,» Terra Latinoamericana, vol. XXII, nº 4, pp. 507-514, 2004. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57311096014>
- [15] Dr. Paul Truong, "Report on the application of vetiver system in the Citarum river basin, Indonesia", Denpasar, Bali, Indonesia, 2010. Disponible en: http://www.vetiver.org/INR_CITARUMo.pdf
- [16] D. Escobar González, *Viabilidad de la implementación del pasto vetiver para la estabilización de taludes en Colombia.* Bogotá, 2014. Disponible en: <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1588/1/documento%20de%20trabajo%20de%20investigaci%C3%B3n.pdf>
- [17] J. M. R. Dalvan José Reinert, *Propriedades físicas do solo*, Santa Maria, RS, Brasil: Universidad Federal de Santa Maria, 2006. https://www.agro.ufg.br/up/68/o/An_lise_da_zona_n_o_saturada_do_solo__texto.pdf
- [18] *Vetiver. La barrera contra la erosión*, 3rd ed. 1995.Traduccion al español del original. https://www.vetiver.org/PUBLICATIONS/TVN_GreenSpan.pdf