



Neiva, junio 12 de 2023

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Daniel Rodríguez Acosta,

con C.C. No. 14395756

Autor(es) de la tesis _____

Titulado Desarrollo de un método sistémico para la rehabilitación ambiental de coberturas vegetales y control de erosión en áreas degradadas bajo principios de bioingeniería de suelos.

presentado y aprobado en el año 2023 como requisito para optar al título de

Doctor en Agroindustria y Desarrollo Agrícola Sostenible;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Desarrollo de un método sistémico para la rehabilitación ambiental de coberturas vegetales y control de erosión en áreas degradadas bajo principios de bioingeniería de suelos.

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Rodríguez Acosta	Daniel

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Torrente Trujillo	Armando

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Doctor en Agroindustria y Desarrollo Agrícola Sostenible

FACULTAD: Ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Doctorado en Agroindustria y Desarrollo Agrícola Sostenible

CIUDAD: Neiva **AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2023 **NÚMERO DE PÁGINAS:** 208

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas___ Fotografías X Grabaciones en discos___ Ilustraciones en general X Grabados___
Láminas___ Litografías___ Mapas X Música impresa___ Planos___ Retratos___ Sin ilustraciones___ Tablas o Cuadros X



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 3
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento:

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Rehabilitación de ladera, raíz	<i>Hillside rehabilitation</i>	6. _____	_____
2. artificial	<i>artificial root</i>	7. _____	_____
3. regeneración natural	<i>natural regeneration</i>	8. _____	_____
4. mantos no convencionales	<i>unconventional layers</i>	9. _____	_____
5. enmiendas orgánicas	<i>organic amendments</i>	10. _____	_____

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

En este estudio se realizó una serie de investigaciones enfocadas al desarrollo de un método sistémico para la rehabilitación ambiental de coberturas vegetales y control de la erosión en áreas degradadas, bajo los principios de bioingeniería de suelos. La primera investigación consistió en determinar la efectividad de dos arquitecturas de raíz con fibras de *Furcraea andina* en suelo con tres clases texturales. Se encontró que la mejor estabilidad, la presentó la raíz parabólica. La segunda investigación determinó las propiedades del suelo, se estimó las pérdidas por erosión hídrica y el índice de productividad. La tercera investigación consistió en la obtención de bioinsumos, los cuales fueron puestos a prueba en la rehabilitación de la zona alta y baja de la ladera, con tres especies forestales. Donde el vermicompost favoreció el desarrollo en todas las especies, siendo *Anacardium excelsum* la de mejor crecimiento. La cuarta investigación consistió en determinar la efectividad de los tratamientos raíz artificial– enmienda – mantos no convencionales (*Manicaria* y Polietileno) y gramínea (*Hyparrhenia rufa*) en la rehabilitación integral de las zonas de mayor pendiente en suelos de tres clases texturales. Se determinó que los subfactores más importantes, fueron el vermicompost y los mantos. La regeneración natural igualó la cobertura de la gramínea incorporada. Con la obtención de los factores C y P para las zonas rehabilitadas, se logró una reducción en la estimación de pérdidas de suelo de $677 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en la zona de mayor pendiente. El peso ecológico de la regeneración natural se determinó con el análisis de imágenes en el software *Image J*. cuyo dominio lo tuvieron las gramíneas al generar cúmulos densos de cobertura en la zona objeto de estudio, con una composición florística de 27 especies.



ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

In this study, a series of investigations focused on the development of a systemic method for the environmental rehabilitation of vegetation covers and erosion control in degraded areas was carried out, under the principles of soil bioengineering. The first investigation consisted of determining the effectiveness of two root architectures with *Furcraea andina* fibers in soil with three textural classes. It was found that the best stability was presented by the parabolic root. The second investigation will reduce the properties of the soil, the losses due to water erosion and the productivity index will be estimated. The third investigation consisted in obtaining bio-inputs, which were put to the test in the rehabilitation of the upper and lower area of the slope, with three forest species. Where the vermicompost favored the development in all the species, being *Anacardium excelsum* the one with the best growth. The fourth investigation consisted of determining the effectiveness of the artificial root-amendment-unconventional mantles (*Manicaria* and Polyethylene) and grass (*Hyparrhenia rufa*) treatments in the integral rehabilitation of the steepest areas in soils of three textural classes. It was concluded that the most important subfactors were the vermicompost and the mantles. Natural regeneration equalized the cover of the incorporated grass. By obtaining the C and P factors for the rehabilitated areas, a reduction in the estimated soil loss was forced from 677 Mg ha⁻¹ year⁻¹ to 1 Mg ha⁻¹ year⁻¹ in the area with the steepest slope. The ecological weight of natural regeneration is prolonged with the analysis of images in the Image J software, whose dominance was given to grasses by generating dense clumps of cover in the study area, with a floristic composition of 27 species.

APROBACIÓN DE LA TESIS

Nombre presidente Jurado:

DEYANIRA LOBO LUJAN

Nombre Jurado:

JOSÉ HORACIO RIVERA POSADA

Nombre Jurado:

ALFREDO OLAYA AMAYA

DESARROLLO DE UN MÉTODO SISTÉMICO PARA LA REHABILITACIÓN
AMBIENTAL DE COBERTURAS VEGETALES Y CONTROL DE EROSIÓN EN ÁREAS
DEGRADADAS, BAJO PRINCIPIOS DE BIOINGENIERÍA DE SUELOS

DANIEL RODRIGUEZ ACOSTA

DOCTORADO EN AGROINDUSTRIA
Y DESARROLLO AGRÍCOLA SOSTENIBLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

NEIVA, 2023

DESARROLLO DE UN MÉTODO SISTÉMICO PARA LA REHABILITACIÓN
AMBIENTAL DE COBERTURAS VEGETALES Y CONTROL DE EROSIÓN EN ÁREAS
DEGRADADAS, BAJO PRINCIPIOS DE BIOINGENIERÍA DE SUELOS

Daniel Rodríguez Acosta

Magíster en Ingeniería y Gestión Ambiental

Armando Torrente Trujillo

Doctor en Ciencias Agropecuarias

Director

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Doctor en Agroindustria y Desarrollo Agrícola Sostenible

DOCTORADO EN AGROINDUSTRIA
Y DESARROLLO AGRÍCOLA SOSTENIBLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

NEIVA, 2023

Resumen

En este estudio se realizó una serie de investigaciones enfocadas al desarrollo de un método sistémico para la rehabilitación ambiental de coberturas vegetales y control de la erosión en áreas degradadas, bajo los principios de bioingeniería de suelos. La primera investigación consistió en determinar la efectividad de dos arquitecturas de raíz artificial con fibras de *Furcraea andina* en muestras de suelo con tres clases texturales, en un diseño factorial, en la cual se encontró que la mejor estabilidad, la presentó la raíz parabólica en todas las muestras. Paralelo a esta investigación se realizó un diagnóstico de la zona objeto de estudio, evaluando la composición florística y determinando las causas y efectos de la degradación mediante la matriz de Leopold y la matriz de importancia de impactos ambientales. En la segunda investigación la ladera se dividió en 6 zonas y en cada una se determinaron las propiedades hidrofísicas y biomecánicas del suelo, con su respectivo análisis de varianza. Se revisaron los datos hidrometeorológicos de 21 años, calculando los índices de Fournier, Fournier modificado, índice de concentración de la precipitación y el EI30, los cuales fueron utilizados para estimar las pérdidas de suelo por erosión hídrica, utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo (*RUSLE*), analizado estadísticamente cada factor. Así mismo se determinó el índice de productividad, clasificando las zonas de acuerdo con su vulnerabilidad a la erosión hídrica. La tercera investigación consistió en la obtención de los bioinsumos para la rehabilitación de las zonas de estudio, para lo cual se procesaron los residuos orgánicos de pulpa de café y estiércol bovino, y se obtuvo compost y vermicompost (con lombriz roja californiana), los cuales fueron puestos a prueba como tratamientos en la rehabilitación de la zona alta y baja de la ladera, con tres especies forestales, bajo un diseño de bloques al azar para cada una (*Anacardium excelsum*, *Jacaranda caucana* y *Cariniana pyriformis*). El vermicompost fue el que permitió el mejor desarrollo en altura y diámetro en todas las especies, siendo *Anacardium excelsum* la que obtuvo un progreso potencial en la ladera. La cuarta investigación consistió en determinar la efectividad de los tratamientos raíz artificial– enmienda – mantos no convencionales (*Manicaria* y Polietileno) y gramínea (*Hyparrhenia rufa*) en la rehabilitación integral de las zonas degradadas de mayor pendiente en suelos de tres clases texturales, en un diseño de bloques al azar para las diferentes zonas, cuyo factor de bloqueo fue la pendiente. En esta investigación se aplicaron 24 tratamientos con tres repeticiones, (216 unidades experimentales). Se determinó que los subfactores más importantes para promover el desarrollo de cobertura y control de la erosión, fueron el vermicompost y los mantos, tanto orgánico como inorgánico pues no presentan diferencias estadísticamente significativas en su efectividad, la regeneración natural igualó la cobertura de la gramínea incorporada. La integración de vermicompost, mantos y raíz artificial resultó ser la combinación más efectiva para la generación de cobertura. De acuerdo con la efectividad de los tratamientos anteriores se obtuvieron los factores C y P para las zonas rehabilitadas, lo cual permitió una reducción en la estimación de pérdidas de suelo de $677 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ a $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en la zona de mayor pendiente. El peso ecológico de la regeneración natural se determinó con el análisis de imágenes en el software *Image J*, cuyo dominio lo tuvieron las gramíneas al generar cúmulos densos de cobertura en la zona objeto de estudio, con una composición florística de 27 especies.

Palabras clave: Rehabilitación de ladera, raíz artificial, regeneración natural, mantos no convencionales, enmiendas orgánicas.

Abstract

In this study, a series of investigations focused on the development of a systemic method for the environmental rehabilitation of vegetation covers and erosion control in degraded areas was carried out, under the principles of soil bioengineering. The first investigation consisted of determining the effectiveness of two artificial root architectures with *Furcraea andina* fibers in soil samples with three textural classes, in a factorial design, in which it was found that the best stability was presented by the parabolic root in all the samples. Parallel to this investigation, a diagnosis of the area under study was carried out, evaluating the floristic composition and determining the causes and effects of degradation using the Leopold matrix and the matrix of importance of environmental impacts. In the second investigation, the slope was divided into 6 zones and in each one the hydrophysical and biomechanical properties of the soil were determined, with their respective analysis of variance. The hydrometeorological data of 21 years are reviewed, calculating the Fournier indices, modified Fournier, precipitation concentration index and EI30, which were used to estimate soil losses due to water erosion, using the Universal Qualification of Soil Loss. (*RUSLE*), statistically analyzed each factor. Likewise, the productivity index will be extended, classifying the areas according to their vulnerability to water erosion. The third investigation consisted of obtaining the bio-inputs for the rehabilitation of the study areas, for which the organic residues of coffee pulp and bovine manure were processed, and compost and vermicompost (with californian red worms) were obtained, which They were put to the test as treatments in the rehabilitation of the upper and lower area of the slope, with three forest species, under a randomized block design for each one (*Anacardium excelsum*, *Jacaranda caucana* and *Cariniana pyriformis*). The vermicompost was the one that allowed the best development in height and diameter in all the species, being *Anacardium excelsum* the one that obtained a potential progress on the slope. The fourth investigation consisted of determining the effectiveness of the artificial root treatments - amendment - unconventional layers (*Manicaria* and Polyethylene) and grass (*Hyparrhenia rufa*) in the integral rehabilitation of degraded areas with a steeper slope in soils of three textural classes, in a randomized block design for the different zones, whose blocking factor was the slope. In this investigation, 24 treatments with three repetitions (216 experimental units) were applied. It was determined that the most important subfactors to promote the development of coverage and erosion control were vermicompost and mantles, both organic and inorganic, since they do not present statistically significant differences in their effectiveness, natural regeneration equaled the coverage of the incorporated grass. The integration of vermicompost, mantles and artificial root turned out to be the most effective combination for the generation of cover. In accordance with the effectiveness of the previous treatments, the C and P factors were obtained for the rehabilitated areas, which allowed a reduction in the estimate of soil losses from 677 Mg ha⁻¹ year⁻¹ to 1 Mg ha⁻¹ year⁻¹ in the steepest area. The ecological weight of the natural regeneration was determined with the analysis of images in the *Image J* software, whose domain was dominated by the grasses when generating dense cumulus coverage in the area under study, with a floristic composition of 27 species.

Keywords: *Hillside rehabilitation, artificial root, natural regeneration, unconventional layers, organic amendments*

Agradecimientos

Al creador, por permitirme vivir un nuevo desafío y, sobre todo, poder superarlo.

A la Doctora Deyanira Lobo Lujan. por direccionarme y contribuir con sus aportes y dedicación al logro del presente estudio.

Al grupo de investigación NOVA, el semillero de investigación de biodiversidad y los programas de control ambiental del Centro de Desarrollo Agroempresarial y Turístico del Huila, (SENA), por ser partícipes de este estudio.

A los Ingenieros Jefferson Maji, Yuberica Suarez y Paola falla por su compromiso y dedicación con sus proyectos en el presente estudio.

A Mery Pérez, por su apoyo incondicional a mis ideas y cuando las cosas se tornaban complejas, siempre tenía las palabras que me reconfortaban para no desistir.

A los Doctores Horacio Rivera, Alfredo Olaya y Armando Torrente por sus recomendaciones.

Tabla de contenido

1.	Introducción.....	21
2.	Objetivo general	29
2.1.	Objetivos específicos	29
3.	Marco teórico.....	30
3.1.	La bioingeniería de suelos.	30
3.2.	Algunas experiencias relacionadas con la bioingeniería de suelos en Colombia. ...	32
3.3.	Métodos convencionales más utilizados para mitigar los impactos ambientales causados por la inestabilidad de suelos.....	35
3.4.	Impactos ambientales en taludes y laderas	35
3.5.	Estimación de la erosión hídrica. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.....	37
3.5.1.	Factor de erosividad de la lluvia, R.....	38
3.5.2.	Factor de erosionabilidad del suelo, K	39
3.5.3.	Factor topográfico, LS.....	39
3.5.4.	Factor de cobertura, C.	40
3.5.5.	Factor de prácticas de conservación, P.....	40
3.6.	Importancia de la vegetación en la rehabilitación ambiental y estabilidad de suelos.. ..	41
3.6.1.	Efecto de la arquitectura de la raíz en la estabilidad de suelos poco profundos. .	45
3.7.	Propiedades del suelo y la erosión hídrica.....	46
3.8.	Mantos o mallas para el control de erosión	48

3.8.1.	Manicaria saccifera	52
3.8.2.	Manto Sintético.	53
3.9.	Bioinsumos orgánicos para la estabilidad de la pendiente.....	54
3.9.1.	Mucílagos y microorganismos.	54
3.10.	Influencia de la materia orgánica sobre las propiedades físicas y químicas del suelo.	55
3.10.1.	Vermicompost y lombricultura.....	56
3.11.	Peso ecológico de las especies dentro del ecosistema herbáceo.....	59
4.	Metodología.....	61
4.1.	Descripción del área objeto de estudio	61
4.1.1.	Descripción de los horizontes del suelo	62
4.1.2.	Características del suelo	63
4.2.	Fase 1. Preliminares. Modelo físico de arquitectura de raíz en muestras de suelos con diferentes clases texturales del área objeto de estudio	63
4.2.1.	Selección, extracción, y análisis de muestras de suelo para pruebas preliminares	63
4.2.2.	Adecuación de muestras y aplicación de tratamientos en las unidades experimentales (UE) preliminares.	64
4.2.3.	Diseño de la investigación preliminar.	66
4.2.4.	Control y seguimiento de unidades experimentales (UE).....	67
4.2.5.	Evaluación.	68

4.3.	Fase 2: Diagnóstico hidrofísico, biomecánico y ambiental del área degradada	69
4.3.1.	Composición florística.	71
4.3.2.	Impactos ambientales en la zona objeto de estudio.....	71
4.3.3.	Descripción del suelo y aislamiento de la zona objeto de estudio.	72
4.3.4.	Recolección de información en campo.	74
4.3.5.	Análisis de las muestras de suelo en el laboratorio.....	75
4.3.7.	<i>Estimación de las pérdidas de suelo</i>	86
4.4.	Fase 3. Bioinsumos potenciales como tratamientos en la rehabilitación del área degradada	91
4.4.1.	Proceso de obtención de enmiendas orgánicas	91
4.4.2.	Validación de las enmiendas orgánicas con las especies forestales (<i>Jacaranda caucana Pittier, Anacardium excelsum</i> y <i>Cariniana pyriformis</i>) para la rehabilitación de la zona alta y baja de la ladera.	94
4.4.3.	Mallas usadas como biomantos en los tratamientos.....	97
4.5.	Fase 4. Determinación de la efectividad de los tratamientos integrados para la rehabilitación ambiental del área degradada de mayor inclinación (zonas: media 1, media 2 y media 3)	98
4.5.1.	Distribución de zonas y unidades experimentales (UE) en las zonas de la parte media de la ladera.	98
4.5.2.	Medición específica de pendientes en cada unidad experimental:.....	99
4.5.3.	Diseño y aplicación de tratamientos para la rehabilitación integral del área	

degradada de mayor pendiente (media 1- arcillosa; media 2- franco arcillosa y media 3 - franco)	100
4.5.4. Control y seguimiento en las unidades experimentales.	105
4.6. Fase 5. Evaluación del peso ecológico de las especies de la regeneración natural.....	106
4.6.1. Análisis de la cobertura vegetal con la ayuda del software <i>Image J</i>	106
4.6.2. Índice de valor de importancia (IVI), de la regeneración natural (RN).	107
5. Resultados.....	111
5.1. Arquitectura de raíz artificial de mayor estabilidad estructural.....	111
5.1.1. Arquitecturas de raíz artificial y mucílago en muestras de suelo arcilloso.	111
5.1.2. Arquitecturas de raíz artificial y mucílago en muestras de suelo franco arenoso	112
5.1.3. Arquitecturas de raíz artificial y mucílago en muestras de suelo franco	114
5.2. Diagnóstico hidrofísico, biomecánico y ambiental del área degradada.....	116
5.2.1. Composición florística.	116
5.2.2. Impactos ambientales en la zona objeto de estudio.....	116
5.2.3. Pendientes generales de cada una de las zonas de ladera objeto de estudio	120
5.2.4. Profundidad efectiva promedio en cada una de las zonas objeto de estudio.....	120
5.2.5. Descripción de los parámetros del suelo en cada una de las zonas de la ladera objeto de estudio.	121
5.2.7. Estimación de las pérdidas de suelo usando la ecuación RUSLE.....	130

5.2.8. Índice de productividad (IP).....	133
5.3. Bioinsumos potenciales como tratamientos en la rehabilitación del área degradada..	136
5.3.1. Evaluación de las enmiendas obtenidas a partir de residuos orgánicos	137
5.3.2. Evaluación de las enmiendas orgánicas en combinación con las especies <i>Jacaranda caucana pittier</i> , <i>Anacardium excelsum</i> y <i>Cariniana pyriformis</i> en la rehabilitación de la zona alta y baja de la ladera.	138
5.4. Efectividad de los tratamientos raíz artificial, enmienda, manto y gramínea) para la rehabilitación integral del área degradada de mayor pendiente (media 1, media 2 y media 3).....	142
5.4.1. Distribución de las pendientes de las UE en tres zonas de la ladera.....	142
5.4.2. Análisis de la efectividad de los tratamientos en el desarrollo de coberturas verdes en la zona media 1, con suelos de textura arcillosa.....	142
5.4.3. Análisis de la efectividad de los tratamientos en el desarrollo de coberturas verdes en la zona media 2, con suelos de textura franco-arcillosa.	148
5.4.4. Análisis de la efectividad de los tratamientos en el desarrollo de coberturas verdes en la zona media 3, con suelos de textura franca.	154
5.4.5. Estimación de las pérdidas de suelo en las zonas rehabilitadas (A2) ($\text{mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), considerando los valores de cobertura (C) y prácticas de conservación (P) implementados en el área objeto de estudio.....	159
5.5. Peso ecológico de las especies de la regeneración natural en la rehabilitación ambiental del área objeto de estudio.....	162

5.5.1. Composición florística de la regeneración natural encontrada en las unidades experimentales de las zonas objeto de estudio.....	163
5.5.2. Peso ecológico de las especies de la regeneración natural (RN).....	164

Lista de Tablas

Tabla 1: Comparación de la composición de celulosa de <i>Manicaria saccifera</i> con otras fibras naturales	52
Tabla 2. Descripción general de las condiciones del suelo de la ladera objeto de estudio	62
Tabla 3. Tratamientos en cada clase textural del suelo	67
Tabla 4. Valores de θ correspondientes a las lecturas	77
del hidrómetro (L) para DTP Tabla 5. Correcciones por temperatura.	77
Tabla 6. Tratamientos implementados en tres especies forestales.	94
Tabla 7. Tratamientos para la rehabilitación de áreas degradadas	101
Tabla 8. ANOVA para la producción de sedimentos en muestras de suelo arcilloso con los factores arquitectura de raíz y mucílago	111
Tabla 9. ANOVA para la producción de sedimentos en muestras de suelo franco arenoso con los factores arquitectura de raíz y mucílago	113
Tabla 10. ANOVA para la producción de sedimentos en muestras de suelo franco arenoso con los factores arquitectura de raíz y mucílago.....	114
Tabla 11. Flora arbórea y herbácea circundante a 20 metros de la zona objeto de estudio ..	116
Tabla 12. Matriz causa y efecto en el área objeto de estudio.....	117
Tabla 13. Matriz de importancia (impactos ambientales en la zona objeto de estudio)	119
Tabla 14. Pendientes generales en porcentaje y grados de las zonas objeto de estudio.....	120
Tabla 15. Profundidad efectiva en cada una de las zonas de ladera.....	120
Tabla 16. Características del suelo en 4 muestras de diferentes zonas de la ladera objeto de estudio	121
Tabla 17. Distribución de tamaño de partículas en las zonas de ladera objeto de estudio.....	128

Tabla 18. Precipitación media mensual, precipitación media anual, MFI 1, MFI2, PCI1, PCI2, EI30.....	129
Tabla 19. Subfactores que determinan erosionabilidad.....	131
Tabla 20. Analisis de las enmiendas obtenidas apartir de residuos de estiércol bovino y pulpa de café	137
Tabla 21. Composición florística de la regeneración natural que se desarrolló en las unidades experimentales de la zona media de la ladera.....	163

Lista de figuras

Figura 1. Palma de <i>Manicaria saccifera</i> y bráctea fibrosa	53
Figura 2. Ubicación del área de estudio.....	61
Figura 3. Modelos de arquitectura de raíz a) Arquitectura parabólica – fasciculada; b) Arquitectura triangular – pivotante	64
Figura 4. Diseño 3D de las unidades experimentales integradas con la arquitectura de raíz. .	65
Figura 5. Construcción de las unidades experimentales en muestras de suelo, con mucilago y arquitecturas de raíz artificial.....	66
Figura 6. Prototipo vertical de modulos giratorios, para el manejo de las unidades experimentales de muestras de suelos (preliminar)	68
Figura 7. Diagrama de la fase preliminar de la investigación sobre la arquitectura de raíz. ...	69
Figura 8. Imágenes de la ladera objeto de estudio.	70
Figura 9. Valoración de impactos ambientales. Adaptado de la guía metodológica para la elaboración de una E.I.A. (Dellavedoya 2016).....	72
Figura 10. Esquema del área objeto estudio y clasificación de zonas de la ladera.	73
Figura 11. Encerramiento y limitación del área objeto de estudio.....	73
Figura 12. Esquema de los puntos de muestreo en las zonas de ladera	74
Figura 13. Construcción de biofabrica	91
Figura 14. Camas para lombricultura en guadua y recubrimiento interno con plástico negro.	92
Figura 15. Residuos orgánicos de beneficio de café (A); estiércol bobino (B) y material organico semicompostado derivado de los dos subproductos anteriores (C).	92
Figura 16. Compost (A), vermicompost con lombrices (B), vermicompost final (C).	93
Figura 17. Distribución de los bloques en la zona alta y baja de la ladera objeto de estudio. .	95

Figura 18. Imágenes del establecimiento de las UE en la zona alta y baja de la ladera	96
Figura 19. Seguimiento del desarrollo de las especies forestales	96
Figura 20: obtencion de manto de polietileno.....	97
Figura 21. Obtencion de Manto de Manicaria sacifera.	98
Figura 22. Distribución de unidades experimentales en las zonas media1, media 2 y Media 3	99
Figura 23. Procedimiento para la medición de pendientes de las unidades experimentales..	100
Figura 24. Equipo de trabajo en alturas (A,B y C)., montaje de tratamientos en las unidades experimentales (D,E y F)).....	102
Figura 25: Marcación de las unidades experimentales	103
Figura 26. Perforaciones para las unidades experimentales	103
Figura 27. Alistamiento de la raíz artificial (A y B), incorporacion de raíz artificial al suelo (C).	104
Figura 28. Vista de planta y de perfil de las unidades experimentales en la parte media de la ladera.....	104
Figura 29. Cuadrícula de la UE para el seguimiento de la regeneración natural en la superficie del manto.....	105
Figura 30. Proceso para el cálculo del área de la cobertura de especies en las unidades experimentales (Rodriguez, 2017).	107
Figura 31. Producción de sedimentos en muestras de suelo arcilloso usando arquitecturas de raíz artificial (triangular y parabólica) y mucílago.	112
Figura 32. Producción de sedimentos en muestras de suelo franco arenoso usando arquitecturas de raíz artificial y mucílago.....	114

Figura 33. Produccion de sedimentos en muestras de suelo franco usando arquitecturas de raíz artificial y mucílago.	115
Figura 34. Valores del ph (A) y conductivdad electrica (B) en los suelos de las zonas de ladera objeto de estudio	122
Figura 35. Valores de la DR (A) y la DA (B) en los suelos de las zonas de ladera objeto de estudio	123
Figura 36. valores de la CIC (A) y la MO (B) en los suelos de las zonas de ladera objeto de estudio	124
Figura 37. Valores del DMP (A) y el IP (B) en los suelos de las zonas objeto de estudio	125
Figura 38. Contenidos de la arcilla(A), limo (B) y arena (C) en los suelos de las zonas objeto de estudio	127
Figura 39. Distribución interanual del IFM anual (A) y del ICP anual (B	130
Figura 40. Factor de erosionabilidad del suelo (A) y factor topografico LS (B) en las zonas de ladera objeto de estudio.....	132
Figura 41. Pérdidas maximas de suelo (A), y Valores del CP_{max} , en cada una de las zonas de ladera objeto de estudio (B).....	133
Figura 42. Efectos de la erosión sobre el subfactor A2 (A) y subfactor B1 (B). en las zonas de estudio.	135
Figura 43. Importancia relativa del horizonte del suelo o subfactor K (A). Indice de productividad en cada una de las zonas de ladera (B).	136
Figura 44. Efecto de las enmiendas en el crecimiento del diámetro y altura de la especie Cariniana pyriformis (zona alta y baja de la ladera).	139
Figura 45. Efecto de las enmiendas en el crecimiento del diámetro y altura de la especie	

Anacadium excelsum (zona alta y baja de la ladera).....140

Figura 46. Efecto de las enmiendas en el crecimiento del diámetro y altura de la especie

Jacaranda caucana (zona alta y baja de la ladera).....141

Figura 47. Efecto de los factores enmienda y manto, con interacion de los subfactores: con raíz artificial y sin gramínea (a); con raíz artificial y con gramínea (b), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 1, con suelo de textura arcillosa.....144

Figura 48. Efecto de los factores raíz y gramínea; con interacción de los subfactores: sin manto y sin vermicompost (a); valor promedio del manto y vermicompost (b); con valor promedio del manto promedio y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 1, con suelo de textura arcillosa.....146

Figura 49. Efecto de los factores gramínea y mantos con interacion de los subfactores: con raíz y sin vermicompost (a); sin raíz y con vermicompost (b); con raíz y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 1, con suelo de textura arcillosa.....148

Figura 50. Efecto de los factores enmienda y manto con interacion de los subfactores: con raíz y sin gramínea (a); con raíz y con gramínea (b), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 2, con suelo de trextura franco arcillosa.150

Figura 51. Efecto de los factores raíz y vegetación; con interacion de los subfactores: sin manto y sin vermicompost (a); manto promedio y sin vermicompost (b); con manto promedio y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 2, con suelo de textura franco arcillosa.....152

Figura 52. Efecto de los factores gramínea y mantos con interacion de los subfactores: con raíz y sin vermicompost (a); de sin raíz y con vermicompost (b); con raíz y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 2, con suelo de textura franco arcillosa.

.....	154
Figura 53. Efecto de los factores enmienda y manto con interacion de los subfactores: con raíz y sin gramínea (a); con raíz y con gramínea (b), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 3, con suelo de textura franca.	156
Figura 54. Efecto de los factores raíz y vegetación; con interacción de los subfactores: sin malla y sin vermicompost (a); de manto y sin vermicompost (b); con manto y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 3, con suelos de textura franca.....	157
Figura 55. Efecto de los factores gramínea y mantos con interacion de los subfactores: con raíz y sin vermicompost (a); de sin raíz y con vermicompost (b); con raíz y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 3, con suelo de textura franco.	159
Figura 56. Comparación entre las estimaciones de pérdidas del suelo encontradas en la fase de diagnóstico cuando el área se encontraba en proceso de degradacion (A), frente a la estimacion de pérdidas cuando se implementaron los factores C y P obtenidos de los mejores tratamientos con los que se rehabilitaron las unidades experimentales en la zona objeto de estudio (B).....	162
Figura 57. Indice de valor de importancia de las especies de la RN encontradas en las unidades experimentales de la zona media de la ladera.....	165
Figura 58. Area objeto de estudio antes de los tratamientos (bloque A); Area despues de implementar los tratameintos para su rehabilitacion de cobertura. (bloque B).	166

Anexos

Anexo 1. Cálculos estadísticos relacionados con arquitectura de raíz artificial y la clase textural arcillosa en la producción de sedimentos.	193
Anexo 2. Cálculos estadísticos relacionados con arquitectura de raíz artificial y la clase textural franco arenosa en la producción de sedimentos.	193
Anexo 3. Cálculos estadísticos relacionados con arquitectura de raíz artificial y la clase textural Franco en la producción de sedimentos.	194
Anexo 4. Estadística relacionada con el pH en cada una de las zonas de la ladera.	194
Anexo 5. Estadística de la conductividad eléctrica en cada una de las zonas de la ladera.	195
Anexo 6. Estadística de la Densidad real en cada una de las zonas de la ladera.	195
Anexo 7. Estadística de la Densidad aparente en cada una de las zonas de la ladera.	196
Anexo 8. Estadística de la capacidad de intercambio catiónico en cada una de las zonas de la ladera objeto de estudio.	196
Anexo 9. Estadística de la Materia orgánica en cada una de las zonas de la ladera	197
Anexo 10. Estadística del diámetro medio ponderado en cada una de las zonas de la ladera	197
Anexo 11. Estadística del índice de plasticidad en cada una de las zonas de la ladera	198
Anexo 12. Estadística de Arcilla en cada una de las zonas de la ladera	198
Anexo 13. Estadística de limo en cada una de las zonas de la ladera	199
Anexo 14. Estadística de arena en cada una de las zonas de la ladera.....	199
Anexo 15. Estadística de la erosionabilidad (K) en cada una de las zonas de la ladera	200
Anexo 16. Estadística de Factor LS en cada una de las zonas de la ladera	200
Anexo 17. Estadística de las pérdidas de suelo (A) en cada una de las zonas de la ladera.....	201

Anexo 18. Estadística de las pérdidas de suelo (CP) en cada una de las zonas de la ladera...	201
Anexo 19. Estadística del Subfactor A2, en cada una de las zonas de la ladera.....	202
Anexo 20. Estadística del Subfactor B1, en cada una de las zonas de la ladera	202
Anexo 21. Estadística del Subfactor K, en cada una de las zonas de la ladera.....	203
Anexo 22. Estadística del índice de productividad, en cada una de las zonas de la ladera.....	203
Anexo 23. Estadística del crecimiento en diámetro para la especie Cariniana Piriformis.....	204
Anexo 24. Estadística del crecimiento en Altura para la especie Cariniana Piriformis.....	204
Anexo 25. Estadística del crecimiento en Diámetro para la especie Anacardium excelsum..	205
Anexo 26. Estadística del crecimiento en Altura para la especie Anacardium excelsum.....	205
Anexo 27. Estadística del crecimiento en Diamtero para la especie Jacaranda Caucana	206
Anexo 28. Estadística del crecimiento en Altura para la especie Jacaranda Caucana	206
Anexo 29. Estadística del desarrollo de cobertura en la zona media de ladera con clase textural Arcillosa.....	207
Anexo 30. Estadística del desarrollo de cobertura en la zona media de ladera con clase textural franco Arcillosa.	207
Anexo 31. Estadística del desarrollo de cobertura en la zona media de ladera con clase textural franco	208
Anexo 32. Estadística de las pérdidas de suelo (A2) en cada una de las zonas de la ladera, implementando el factor C y P obtenidos en la rehabilitacion de las zonas de ladera.	208

1. Introducción

La erosión y los deslizamientos son problemas degradativos, que avanzan en forma acelerada a nivel mundial, debido al uso y manejo inadecuado de suelos y aguas (Flores, 2014), En zonas de ladera, las afectaciones por erosión son el producto de factores como la deforestación, ganadería, construcción de vías, conflictos de uso de las tierras y demás relacionados, generando deformación e inestabilidad por fractura de los suelos, afectación a recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos, e impactos ambientales negativos que causan pérdidas significativas de recursos naturales, así como humanas y económicas. El nivel de afectación cambia en razón a las condiciones geológicas y la vulnerabilidad socioeconómica de la zona (Aristizábal *et al.*, 2016). Lograr la estabilidad del suelo en áreas degradadas con base en medidas sostenibles en el tiempo, amigables con el ambiente y de bajos costos es una necesidad inmediata, ya que la erosión es un fenómeno que se presenta con mucha frecuencia (Liu y Feng, 2016). En Colombia, los costos de obras duras para la estabilización de laderas se realizan mediante obras mecánicas propias de la ingeniería civil, los cuales son extremadamente altos, y superan el valor comercial de la tierra (Rivera, 2017), ya que por lo general los problemas por erosión son abordados de manera puntual y no integral, lo que no garantiza que se resuelva los problemas en forma definitiva (Rivera *et. al* 2007). La bioingeniería de suelos se presenta como una alternativa económicamente viable, con un alto potencial de restauración con recursos que se pueden conseguir en la misma finca (Rivera 2001), pero que en gran medida carece de apoyo del estado.

En Colombia se presentan condiciones de ecosistema frágiles con pendientes planas que van de 0 - 12%, hasta escarpadas mayores del 75% con longitudes de 300 - 800m, a medida que se desgasta la capa orgánica del suelo se disminuye la fertilidad natural, la actividad biológica, el

almacenamiento de las aguas incrementa la esorrentía y los caudales torrenciales en los drenajes naturales que se contaminan con los sedimentos de la erosión, lo cual puede conducir a inundaciones, avalanchas, colmatación de embalses, destrucción de viviendas, puentes y carreteras (Rivera, 1996).

En el departamento del Huila son comunes los impactos ambientales que se derivan de la erosión, ocasionados por las actividades antrópicas, así como los fenómenos naturales que se manifiestan por la baja estabilidad de los materiales que conforman el suelo, los cuales afectan la infraestructura regional y la integridad de los recursos naturales, quedando en riesgo ecosistemas estratégicos, zonas potenciales para la seguridad alimentaria, vías, entre otros. Las zonas que no se rehabilitan de manera efectiva en el control de erosión y desarrollo de coberturas vegetales, quedan vulnerables a diferentes fenómenos, como reptaciones surcos, cárcavas, remociones en masa, golpes de cuchara y todo tipo de afectaciones que se acrecientan por la pérdida de estructuración que brinda la flora con sus raíces y cada una de las partes que la integran. El uso no sostenible de los recursos naturales y la no aplicación de prácticas preventivas y correctivas de conservación en áreas degradadas, asociado al desconocimiento y los altos costos para rehabilitar las mismas, crean la necesidad de desarrollar nuevas técnicas y métodos sostenibles que se integren de manera eficiente a los ya establecidos en bioingeniería del suelo.

En este sentido, se planteó como pregunta de investigación: ¿cuáles serían los tratamientos no convencionales que más contribuirían al desarrollo de un método sistémico de rehabilitación ambiental de coberturas y control de erosión en áreas degradadas?

Este estudio presenta una alternativa complementaria a las técnicas de bioingeniería del suelo, mediante el desarrollo de un método sistémico para la rehabilitación ambiental y control de erosión además de generar experiencias prácticas que permiten analizar de manera científica los

resultados, y así validar las técnicas en pro de la sostenibilidad ambiental ligada al suelo (Aronson y Alexander, 2013). En bioingeniería, la mayor parte de la literatura existente se ha centrado principalmente en el refuerzo mecánico del suelo provisto por las raíces de las plantas, por lo cual se viabilizó la replicación de estas formas estructurales (Zhang *et al.*, 2019); además, que todos los órganos de la planta presentan un papel fundamental en la rehabilitación ambiental, ya que permiten la restauración de la regulación hídrica, atmosférica, climática y de suelos donde la flora pionera, atrae polinizadores y brindan hábitat a muchas especies silvestres que contribuyen a la recuperación de los ecosistemas degradados (Sánchez y Osorio, 2018). En estudios de Rivera (2018), se reporta que la vegetación nativa al esparcirse por la zona degradada genera una cobertura en el suelo que aumenta el coeficiente de rugosidad de Manning, el refuerzo mecánico dado por las raíces, así como la estructura del suelo, la cohesión y la resistencia al cortante tangencial del suelo. Razón por la cual entender la dinámica de la regeneración natural de la vegetación en áreas degradadas afectadas por la erosión, facilita la recreación de procesos de reversibilidad y recuperabilidad de un ecosistema.

Teniendo en cuenta lo anterior en este estudio se realizó una serie de investigaciones enfocadas al desarrollo de un método sistémico para la rehabilitación ambiental de coberturas vegetales y control de la erosión en áreas degradadas, bajo principios de bioingeniería del suelo, los cuales se desarrollaron en una ladera a borde de la vía, que había sido afectada por procesos de movimiento en masa y erosión, ubicado en la finca El Kirpal, km 5 vía nacional, la Plata - Neiva, vereda Lusitania del departamento del Huila, en las coordenadas (N:02° 24' 47,9"; W:075° 51' 45,7"), a una altitud de 1530 msnm.

De manera inicial se desarrolló una investigación exploratoria, experimental en laboratorio con el propósito de identificar un modelo físico de arquitectura de raíz artificial de mayor

estabilidad estructural a partir de fibras orgánicas de *Furcraea andina* y mucílago de *Aloe vera* en muestras de suelo disturbado con clase textural Arcillosa, franco arenoso y franco, obtenidas del área que se encontraba degradada. Las cuales se sometieron a esfuerzos mecánicos y ciclos de humedecimiento y secado, mediante un sistema prototipado vertical, con el propósito de analizar la producción de sedimentos y valoración de la estabilidad. Se implementó un diseño factorial para cada una de las clases texturales de suelo, el factor 1, se refirió a la arquitectura de raíz con tres niveles de factor (triangular, parabólica y sin arquitectura) y el factor 2 correspondió al mucílago con dos niveles (con mucílago, y sin mucílago), por lo cual se aplicaron 6 tratamientos a cada clase textural de suelo bajo 3 repeticiones en 54 unidades experimentales. Obteniendo como resultado que la mejor estabilidad se obtuvo cuando se aplicó de forma única la arquitectura de raíz parabólica.

Paralelo a lo anterior se realizó la segunda investigación enfocada en el diagnóstico de la zona objeto de estudio, evaluando la composición florística (20 metros a la redonda de la ladera), que podría influir en el área de estudio, las causas y efectos de la degradación mediante la matriz de Leopold y la matriz de importancia, con la cual se valoraron los impactos ambientales negativos y se dio línea base a los programas de manejo para la rehabilitación. La ladera se dividió en 6 zonas de acuerdo con su inclinación, y se clasificaron como: cultivo, alta, media1, media 2, media 3, y baja, en las cuales se tomaron 4 puntos de muestreo para cada una y se analizaron las variables del suelo. En laboratorio se analizó: pH, conductividad eléctrica, densidad real, densidad aparente, distribución del tamaño de partículas, índice de plasticidad, infiltración, arenas, limo, arcilla, capacidad de intercambio catiónico, materia orgánica; mientras que en el campo se evaluaron la infiltración y la profundidad efectiva. A cada variable del suelo se le realizó un análisis de varianza y se determinó las similitudes y diferencias entre las zonas.

También se realizó una revisión de los datos hidrometeorológicos de 21 años para la zona de estudio, y se calcularon los índices de Fournier (IF) y Fournier Modificado (IFM), el Índice de Concentración de la Precipitación (ICP) y el EI₃₀. Estos índices junto con las variables del suelo fueron utilizados para realizar las estimaciones de las pérdidas de suelo por erosión hídrica, utilizando la ecuación universal de pérdida de suelo (*RUSLE*), donde cada factor fue analizado de manera estadística utilizando el software *Design-Expert*. Seguido se procedió a determinar el índice de productividad realizando un ANOVA por cada subfactor que lo componía, clasificando las zonas de acuerdo con su vulnerabilidad y medida de manejo.

La tercera investigación se enfocó en establecer los bioinsumos potenciales para la rehabilitación del área degradada, por lo cual se procedió con la realización de una biofabrica con materias prima de la zona, en la cual se procesaron los residuos orgánicos de mayor disponibilidad del municipio de La plata (pulpa de café y estiércol bovino), y se generaron las enmiendas orgánicas de compost y vermicompost, las cuales fueron puestos a prueba como tratamientos para la rehabilitación de la zona alta y baja de la ladera con tres especies forestales (*Anacardium excelsum*, *Jacaranda caucana* y *Cariniana pyriformis*) en un diseño de bloques al azar, con 6 repeticiones para cada especie, en donde se evaluaron 3 tratamientos en 54 unidades experimentales. Por lo anterior se evidencio que las dos enmiendas son potenciales para la rehabilitación de suelos degradados, pero que el mejor comportamiento para promover el crecimiento en altura y diámetro de tallo lo presento el vermicompost y la especie con mayor adaptabilidad y eficiente desarrollo fue el *Anacardium excelsum*, Por lo anterior esta enmienda se seleccionó como uno de los factores para rehabilitar las zonas de mayor inclinación. Por otro lado, la obtención de los insumos de mantos no convencionales, se obtuvieron de moldear manualmente la bráctea de la palma de *Manicaria saccifera* de acuerdo a los estudios realizados

por Rodríguez (2017) para obtener el manto orgánico, mientras que el manto inorgánico se obtuvo de una malla de polietileno al 50% de sombra y la gramínea que se seleccionó por su peso ecológico, como vegetación a incorporar en las zonas de mayor degradación fue *Hyparrhenia rufa*.

La cuarta investigación consistió en determinar la efectividad de los tratamientos anteriormente obtenidos (modelo de arquitectura de raíz – enmienda – mantos y gramínea) para la rehabilitación integral de las zonas degradadas de mayor pendiente. Por lo cual al área de mayor inclinación de la ladera se dividió en tres zonas de 50 m² que correspondieron a media 1 (suelo arcilloso), media 2 (suelo franco arcilloso) y media 3 (suelo franco), en cada uno se ubicaron 72 unidades experimentales de 3500 cm², correspondiente a 24 tratamientos con tres repeticiones, para un total de 216 UE. El diseño implementado para cada zona fue bloques completamente al azar, donde el factor de bloqueo fue la pendiente. Los factores que se tuvieron en cuenta fueron gramínea con 2 niveles de factor (con gramínea y sin gramínea), como factor 2 el modelo de raíz artificial (con raíz y sin raíz), el factor 3 fue la enmienda, con dos niveles de factor (con vermicompost y sin vermicompost) y el factor 4, que se refiere a manto con tres niveles de factor (*Manicaria*, polietileno y sin manto). En esta investigación se determinó las mejores combinaciones de los tratamientos para la rehabilitación de coberturas vegetales, en donde con la combinación de raíz artificial, con manto de *Manicaria*, incorporación del vermicompost y la regeneración natural (RN), permitieron obtener valores del 100% de cubrimiento de cobertura en las unidades experimentales. Esta efectividad fue similar al sustituir el manto de *Manicaria* por el de polietileno, donde la diferencia principal radicó en que la *Manicaria* es biodegradable. Con la incorporación de la gramínea también fue posible obtener valores máximos de cubrimiento de cobertura, teniendo en cuenta que cuando esta no se aplicó,

la RN alcanzo valores similares, lo que permitió obtener una mayor diversidad y adaptabilidad de las especies. En cuanto a la incorporación de la raíz artificial, esta facilitó el cubrimiento rápido de cobertura, pero su efectividad es limitada en comparación con el manto y el vermicompost, los cuales fueron indispensables para la rehabilitación ambiental de la ladera. Con la información obtenida de esta investigación se determinaron los factores C y P, lo cuales fueron implementados en la ecuación de *RUSLE* y se estimó las pérdidas de suelo de la zona rehabilitada y se comparó con las registradas en el diagnóstico inicial de la ladera. Evidenciando una reducción altamente significativa en la estimación de las pérdidas de suelos de cada una de las zonas de la ladera objeto de estudio.

La quinta investigación consistió en determinar el peso ecológico de las especies, en las unidades experimentales que no se les incorporó gramínea, de tal manera que se analizó la dinámica de la regeneración natural, mediante la relación de monitoreo y registros fotográficos analizados con el software *Image J*. donde se identificó la abundancia, dominancia y frecuencia de la RN, y se determinó una composición florística de 27 especies, donde dos de ellas eran árboles y 25 parte de la flora herbácea, cuyo dominio lo tuvieron las gramíneas al generar cúmulos densos de cobertura en la zona objeto de estudio.

El presente estudio permitió la generación de nuevos conocimientos en conservación y estabilidad de suelos a nivel de laboratorio y campo, contribución de nuevas especies de flora para la recuperación de laderas, validación de enmiendas orgánicas en la rehabilitación de zonas degradadas, protocolos metodológicos para el análisis de la información de la regeneración natural y sostenibilidad ambiental bajo la implementación de trabajo seguro en alturas. como aporte a la bioingeniería del suelo, con miras a que la comunidad pueda adoptar las metodologías y se involucren en futuros procesos de investigación participativa.

Esta investigación se articuló con el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 en el pacto IV de sostenibilidad “Producir conservando y conservar produciendo” (Ley N° 1955 del 25 de mayo de 2019), que enfatizó en Colombia resiliente, el conocimiento y la prevención para la gestión del riesgo de desastres y adaptación al cambio climático, así como biodiversidad y riqueza natural.

La línea de investigación se relacionó con Suelo-agua-Planta-Clima y se ajustó al Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sector Agropecuario Colombiano (2017-2027), teniendo en cuenta que el estudio comprendió técnicas y procesos que mitigaron la degradación de los suelos, el ambiente y los hábitats de vida silvestre (Colciencias *et al.*, 2016).

2. Objetivo general

Desarrollar un método sistémico para la rehabilitación ambiental de coberturas vegetales y control de erosión en áreas degradadas bajo principios de bioingeniería de suelos.

2.1. Objetivos específicos

- Identificar el modelo físico de arquitectura de raíz de mayor estabilidad estructural en muestras de suelos del área degradada objeto de estudio, a partir de fibras orgánicas de *Furcraea andina*.
- Diagnosticar de manera hidrofísica, biomecánica y ambiental el área degradada objeto de estudio como insumo de análisis para evaluar la rehabilitación en el área objeto de estudio.
- Establecer los bioinsumos potenciales que se usarán como tratamientos en la rehabilitación del área degradada
- Determinar la efectividad de los tratamientos (modelo de arquitectura de raíz – enmienda – mantos y gramínea) para la rehabilitación integral del área degradada de mayor pendiente.
- Evaluar el peso ecológico de las especies de la regeneración natural en las unidades experimentales, como factor esencial en la rehabilitación ambiental de áreas degradadas

3. Marco teórico

El presente estudio se enfocó en el desarrollo de un método sistémico para la rehabilitación ambiental de coberturas vegetales y control de erosión en áreas degradadas bajo principios de bioingeniería del suelo, por lo cual la temática se abordó a partir de resultados de investigaciones de diferentes lugares del mundo, que sirvieron como ejes conceptuales y permitieron evidenciar los vacíos de investigación.

3.1. La bioingeniería de suelos

Hace referencia a la prevención en el control de erosión, protección, de suelos, estabilización de taludes, y problemas de movimientos en masa con base en los parámetros de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos y de la resistencia al cortante tangencial, que tienen en cuenta los procesos físicos, químicos y biológicos de los fenómenos degradativos (Flores, 2014). De acuerdo con Rivera (2009), la bioingeniería es una disciplina única en el sentido que las mismas partes de las plantas (raíces y tallos) sirven como elementos estructurales del suelo en los sistemas de protección de laderas y que con el pasar del tiempo se transforman en obras vivas, que brindan refuerzo mecánico, así como drenajes hidráulicos y barreras para contener la erosión y los movimientos en masa.

Hubble *et al.*, (2017) consideran la bioingeniería como una disciplina que utiliza una combinación de materiales abióticos y bióticos para proporcionar una técnica de restauración sostenible y respetuosa con la naturaleza, al utilizar estacas vivas, fascinas, ramas, mantos, vegetación, muros, filtros y trinchos de guadua o madera. Centrado principalmente en el refuerzo mecánico del suelo provisto por las raíces de las plantas y en la búsqueda de especies de plantas autóctonas disponibles. A pesar de todas las investigaciones realizadas en bioingeniería del suelo en el mundo, aún existen vacíos de conocimientos, por lo que en esta investigación se

identificaron y replicaron formas estructurales en la fase inicial de la colonización de la planta.

La bioingeniería de suelos tiene una larga tradición histórica con medidas básicas para la recuperación de áreas degradadas; sin embargo, el uso indebido de esta puede traer consecuencias graves (Zhang *et al.*, 2019) para la sostenibilidad ambiental y credibilidad de la disciplina. Por ejemplo una obra de bioingeniería, son los trinchos, los cuales cuando no son contruidos con las especificaciones técnicas, son vulnerables a el impacto del agua, la mayoría de las veces en lugar de dar solución al problema, conducen a acelerar los procesos erosivos, como lo es un trincho con vertedero muy pequeño o sin él, que conlleva a la acumulación de sedimento hasta taponar el canal y obligar a las aguas de escorrentía a desviarse hacia sitios menos protegidos, originando cárcavas nuevas; Trinchos sin amortiguador de las aguas provenientes del vertedero, que dan lugar al socavamiento de la base del trincho y desplome posterior del mismo, o cuando se realizan con alturas superiores a 100 centímetros, ya que retienen demasiados sedimentos, y el trincho termina volcado (Rivera, 2002).

La bioingeniería de suelos es una tecnología que anima a científicos y profesionales a combinar sus conocimientos y habilidades en la gestión de ecosistemas. Para que un proyecto de bioingeniería tenga éxito se debe resaltar todos los beneficios potenciales, documentar los valores técnicos, ecológicos, económicos y sociales, por lo cual los nuevos enfoques utilizados por bioingenieros plantean interrogantes a los investigadores y requieren la innovación de profesionales para diseñar conceptos y técnicas de bioingeniería (Rey *et al.*, 2019).

Giupponi *et al.*, (2017) consideran que las evaluaciones cuantitativas de las medidas de bioingeniería de suelos son escasas, siendo así que la evaluación del éxito de estas técnicas son un tema poco abordado por la comunidad científica. Aunque la bioingeniería de suelos se utiliza cada vez más en todo el mundo para mitigar el impacto en el medio ambiente, el paisaje

y todos los derivados de la erosión.

3.2. Algunas experiencias relacionadas con la bioingeniería de suelos en Colombia

Los estudios realizados por el Centro de Investigaciones de Café (Cenicafé) desde el año 1945, han permitido a través de las últimas décadas, diseñar sistemas integrales de uso, manejo y conservación para disminuir la erosión, como lo son la selección y localización apropiada de cultivos (Relación suelo -clima-planta), siembra en contorno, fertilización con base en los análisis de suelo, conservación de coberturas de porte bajo para favorecer la infiltración y reducir el impacto del agua y la escorrentía; siembra de barreras vivas con gramíneas, sombrío en pendientes fuertes; implementación de coberturas muertas (hojarasca y ramillas); cultivos intercalados, acequias de ladera, zanjillas de desagüe, terrazas individuales, conducción de aguas de escorrentías a sitios protegidos por vegetación natural y flora multi-estrato (Gómez y Rivera, 1993).

Teniendo en cuenta lo anterior, Cenicafé fue uno de los pioneros en promover conocimientos para fundamentar la bioingeniería de suelos en Colombia. Gómez y Alarcón (1975), elaboraron bajo la dirección de la Federación Nacional de Cafeteros, el “Manual de conservación de suelos de ladera”, en cuyo texto se encuentra información importante sobre la erosión y la conservación de suelos en Colombia, las prácticas culturales de conservación, prácticas mecánicas de conservación, cuencas hidrográficas, control de la erosión, y el uso y manejo de los suelos de la zona cafetera. Lo cual ha permitido que tanto agricultores como técnicos, profesionales e investigadores, implementen técnicas para la sostenibilidad del suelo y sus cultivos, así como las bases de investigaciones en mejora continua de procesos relacionados a las afectaciones del suelo, principalmente en ladera.

En 1980 surgió el proyecto Checua – PROCAS, por iniciativa de la Corporación Autónoma

Regional de Cundinamarca (CAR), para estabilizar suelos afectados por procesos erosivos existentes en la Cuenca del Río Checua. Las entidades participantes fueron la CAR con el apoyo del Ministerio Alemán de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) a través de la Agencia Alemana de Cooperación Técnica: *Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit* (GTZ) y del Banco Alemán para la Reconstrucción: *Kreditanstalt für Wiederaufbau* (KfW). El proyecto se desarrolló en cinco fases las cuales se realizaron entre 1980 y 1999, con el propósito de estabilizar suelos y prevenir el avance de la erosión, mediante procesos de participación comunitaria y capacitación para el manejo y conservación de los suelos y aguas, en las que se realizó la construcción de obras biomecánicas para aumentar la capacidad de retención de agua en la cuenca y favorecer el desarrollo de la cobertura vegetal (CAR, 2006).

Rivera *et al.*, (1986), Realizaron el plan de uso, manejo y conservación de los suelos del centro agropecuario Cotové, de la universidad nacional, sede Medellín, en el cual se incluye información clave para abordar las afectaciones al suelo y se resalta la importancia de la bioingeniería para Colombia. Por otro lado con la financiación de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC), el Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), después del terremoto de enero 25 de 1999 en el eje cafetero, se enseñaron técnicas de bioingeniería a las comunidades del municipio como la Corporación Ecoambientes y la Cooperativa de Parceleros de Villa Rosa, los cuales ejecutaron las técnicas para la prevención y control de la erosión, la protección y estabilización de taludes, con la colaboración del investigador Horacio Rivera, lo cual tuvo como resultante la recuperación de los suelos afectados a un costo muy bajo en comparación con las obras de ingeniería convencional (Miranda, 2016).

Rivera, (2013), puso en evidencia la viabilidad de la bioingeniería del suelo en su documento:

Experiencias de casos exitosos, con el uso de bioingeniería en el control de problemas de erosión y movimientos masales. Determinó la efectividad, economía e impacto ambiental entre la bioingeniería y la ingeniería convencional al comparar los resultados en dos cárcavas (El Tablazo en Caldas y Tejares, Valle). Teniendo en cuenta que las dos presentaban similitudes en material parental, suelos, clima, pendientes y tamaño de área, concluyo que las dos tecnologías eran totalmente compatibles y complementarias, siempre y cuando la solución fuera multi e inter – disciplinaria, con base en la relación causa – efecto, para poder definir técnica y científicamente donde aplicar una tecnología, o en forma conjunta. Lo que disminuiría significativamente los costos de implementación.

Con el apoyo de la CAR, Rivera *et al.*, (2013), elaboraron el manual de procedimientos para el manejo de procesos denudativos con obras de bioingeniería de suelos, en el cual se evidencia los fundamentos de las obras prácticas, los protocolos para establecer este tipo de obras en lo que incluye: taponamiento de grietas, biofiltros, trinchos vivos, disipadores, terrazas escalonadas, así como los usos de la vegetación en el control hidrológico, la arquitectura de las raíces y su importancia mecánica, además de las especies usadas para la estabilización de laderas y las recomendaciones de siembra

Flórez, (2014), realizó el estudio de efectividad de la bioingeniería para el tratamiento de la erosión y los movimientos en masa de laderas, en tres localidades del departamento de Caldas, concluyendo que las obras de bioingeniería de suelos, generan resultados óptimos en la rehabilitación del suelo y recuperación de los ecosistemas asociados; así mismo que la participación comunitaria y los bajos costos de inversión, permiten agilizar la recuperación de zonas degradadas en ladera, por lo cual el estado debería promover y patrocinar ese tipo de técnicas.

3.3. Métodos convencionales más utilizados para mitigar los impactos ambientales causados por la inestabilidad de suelos

Los métodos convencionales son: la vegetación, hidromulch, geotextiles, malla de alambre, agentes estabilizadores del suelo, mineralización, mantos orgánicos e inorgánicos, prefabricados, hormigón, lona y mampostería (Liu *et al.*, 2011). Estos métodos presentan un nivel de efectividad relativa y se diferencian en los costos de establecimiento, teniendo en cuenta que muchos no proporcionan fuerzas de resistencia sustanciales a la pendiente como lo hacen las estructuras de retención y los sistemas de anclaje (Tang *et al.*, 2018). Las obras en concreto en ocasiones propician mayor peso en la ladera y acumulación de aguas causando saturación del terreno, lo que da origen a la formación de coladas de lodo que pueden arrastrar consigo las obras realizadas. Al tener en cuenta los principios teóricos de los procesos de degradación, se hace más sencillo y económico brindar una solución de tipo biológico, con el cual se tiene en cuenta los procesos intrínsecos (Rivera, 1998).

En algunos lugares de Colombia donde predomina la erosión de tipo superficial, con presencia de surcos y/o cárcavas, se han implementado con éxito, tratamientos que se centran en el aumento de la rugosidad del terreno y la reducción de la longitud de la pendiente, como pocetas, zanjas de infiltración, trinchos, y diques, que permiten la infiltración de agua y retienen sedimentos, lo cual acelera el establecimiento natural de especies vegetales rastreras que mejoran la cobertura del terreno y detienen la erosión (Rivera *et al.*, 2015)

3.4. Impactos ambientales en taludes y laderas

Cuando se construyen carreteras, infraestructuras y demás obras en zonas montañosas, por lo general se generan impactos ambientales negativos asociadas a las pérdidas de las coberturas. La inestabilidad de suelos es un problema común que se presenta con mayor frecuencia en zonas de

alta pendiente, donde la vegetación puede mejorar la estabilidad de esta a través de sus componentes mecánicos e hidráulicos (Liu y Feng, 2016).

Varios estudios demuestran que las geoformas del talud y la ladera, cóncavas en planta y perfil son aproximadamente 1.5 veces más susceptibles que las geoformas rectas y convexas. La convergencia de la trayectoria del flujo en áreas cóncavas crea zonas saturadas que generan mecanismos de falla del tipo traslacional, que puede detonar deslizamientos (Camacho y Ramos, 2016). Por esta razón, la influencia de la flora es definitiva en la estabilidad del terreno, la cual ha sido reconocida a través de pruebas de centrifugación y modelado numérico utilizando el método de elementos finitos para encontrar la solución a las fuerzas y deformaciones, al minimizar la energía potencial del sistema bajo las cargas aplicadas (Chok *et al.*, 2015). Así mismo se ha mostrado que el factor de seguridad en una pendiente aumenta cuando se toma en consideración el efecto del refuerzo de las raíces (cohesión y profundidad de la zona de raíz). La degradación del suelo en terrenos montañosos y laderas puede generar procesos denudativos, tanto por la acción del agua, en el arrastre de partículas, como por la acción de la gravedad, las cuales pueden provocar procesos en conjunto, como erosión y remoción en masa, o actuar de manera individual sobre un terreno (Rivera *et al.*, 2015).

Lozano *et al.*, (2000) expresan la degradación de suelos como la reducción de su calidad con relación a la productividad de los cultivos, cuyo principal efecto es el deterioro de la estructura del suelo y que se evidencia en problemas de sellado, encostrado, compactación, drenaje deficiente, poca aireación y erosión evidente. En zonas de ladera es común observar taludes naturales y artificiales, generados por caminos, carreteras y taludes de construcciones, totalmente desprovistos de coberturas vegetales y expuestos al impacto directo de las lluvias (Rivera, 2001).

3.5. Estimación de la erosión hídrica. Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

Para estimar la erosión acelerada de suelo, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, *USLE*, (*Universal Soil Loss Equation*) desarrollada por Wishmeier y Smith (1968) es la que ha tenido mayor aceptación por su alta correlación con las pérdidas de suelo. esta ecuación, así como su modificación, la *RUSLE* (Renard, 19997), han sido utilizadas en muchos países para evaluar problemas de erosión hídrica. Esta ecuación considera las precipitaciones como el principal agente activo de la erosión superficial y establece que las pérdidas de suelo anuales son directamente proporcionales al índice de erosividad de las lluvias, en relación con la energía cinética de los eventos de lluvia y su intensidad máxima. Estas condiciones pueden producir valores de pérdidas de suelo diferentes, de acuerdo con las características del suelo sobre el que actúan en relación con la textura, estructura, contenido de materia orgánica y permeabilidad, y que se puede intensificar de acuerdo con la pendiente y al sitio que se encuentre a lo largo de ella, donde el tipo de cobertura influirá de manera significativa, así como las prácticas de conservación (González, 1991, Silva, 1995). Seguido se presenta la ecuación universal de pérdida de suelos:

Ecuación 1. $A = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P$

Donde:

A: pérdida de suelo, expresada, en el sistema métrico internacional, en $\text{Mg. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$

R: Energía erosiva de la lluvia ($\text{MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$).

K: factor de erodabilidad del suelo o erosionabilidad del suelo [$(\text{Mg. ha}^{-1}) \cdot (\text{Mj} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})^{-1}$]

L: factor de longitud (m)

S: factor del grado de pendiente (%)

C: factor de cultivo (adimensional)

P: factor de prácticas de conservación (adimensional)

3.5.1. Factor de erosividad de la lluvia, R.

Este factor se le conoce como índice de erosión pluvial y recoge la influencia, que sobre la erosión tiene la energía cinética de los eventos de lluvia, disgregando las partículas del suelo y compactando su superficie, determina la aparición de escorrentía superficial cuando se supera la capacidad de infiltración del suelo. La energía cinética de la lluvia se dispone en función del tamaño dominante de las gotas de agua, que a su vez se relaciona con su intensidad. Cuando las intensidades de lluvia oscilan entre 50 y 100 mm por hora, o superan los 200 mm/h las gotas son grandes con diámetros superiores a 4mm, las cuales son inestables y más erosivas (Hudson, 1963). El índice propuesto en la Ecuación Universal para cuantificar este efecto erosivo de las lluvias debido a su intensidad tiene como expresión:

$$\text{Ecuación 2. } R = EI_{30}$$

Donde:

R = es el índice de erosividad de la lluvia ($\text{MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)

E: la energía cinética del evento de lluvia, estimada a su vez por la ecuación 3.

$$\text{Ecuación 3. } E = (0,119 + 0,0873 \log_{10} I) I_{30}$$

Donde:

E: energía cinética ($\text{Mj}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$).

I: intensidad ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$).

I_{30} : intensidad máxima en 30 min

Para el cálculo del valor de R general, se realiza, el análisis de las bandas pluviográficas locales y luego se halla el valor R de cada evento de lluvia de un mismo año, y se repite el cálculo para un período de años representativos. Después se multiplica por la intensidad máxima en 30 min. Finalmente se calcula el valor medio de R anual, como la media aritmética de los valores de R anuales del período de años considerado (González, 1991; Silva, 1995).

3.5.2. Factor de erosionabilidad del suelo, K.

La vulnerabilidad a la erosión es una característica propia del suelo ligada a su granulometría, porosidad, condiciones hidrológicas, y demás relacionadas. Es distinta a la erosión del suelo, la cual obedece a un proceso resultante de esta erosionabilidad expuesta a unas determinadas condiciones de clima, relieve y cobertura vegetal. El factor K de la USLE cuantifica la erosionabilidad de cada suelo mediante una expresión deducida experimentalmente y representa la tasa de erosión del suelo por unidad de índice de erosión pluvial (R), cuando las condiciones de relieve y de vegetación son consideradas estándar y en la Ecuación universal, los factores L, S, C y P valen la unidad (Gonzales, 1991).

Wischmeier y Smith (1978), estiman el valor de K en función de la textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad del suelo. Considerando que estos factores en su orden determinan la erosionabilidad de cada suelo. Es decir que los más erosionables corresponden a texturas intermedias (fracción de limos abundante). Por lo cual la resistencia a la erosión se debe al aumento del porcentaje de elementos más finos (arcillas) que aumentan la cohesión del suelo, o por un aumento del porcentaje de elementos más gruesos (arenas) con los que se mejoran las condiciones de infiltración y se retrasa la aparición de escorrentía superficial., así mismo el contenido de materia orgánica suministra estabilidad a los agregados del suelo, mejora su estructura y resistencia a la erosión.

3.5.3. Factor topográfico, LS.

Tanto la longitud de la ladera como el gradiente de la pendiente influyen considerablemente en las tasas de erosión de un suelo, siendo el relieve uno de los principales factores que determinan la remoción de sedimentos. Se considera la longitud como la distancia que recorre la gota de escorrentía desde que se forma, en la divisoria, hasta que encuentra un cauce o una zona

de sedimentación. La influencia de la pendiente sobre la erosión es muy notable, ya que es directamente proporcional a la cantidad de escorrentía que se genera en una ladera por unidad de superficie y determina la velocidad de las aguas y su fuerza de arrastre (Wischmeier y Smith, 1978).

3.5.4. Factor de cobertura, C.

La cubierta vegetal es el elemento natural de protección del suelo frente a la fuerza erosiva de las precipitaciones, controlando no sólo la energía con la que llegan las gotas de lluvia a la superficie del suelo, sino la velocidad de la escorrentía superficial. El factor C de la *USLE* recoge esta influencia debida no sólo al tipo de vegetación existente, sino al manejo o disposición de los residuos que produce sobre el suelo. la mayor protección de la vegetación en contacto con el suelo se genera a partir de herbáceas, restos vegetales y mulch (Wishmeier y Smith, 1978).

3.5.5. Factor de prácticas de conservación, P.

Se determina por la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelos sobre las tasas de erosión de una parcela, realizando trabajos culturales o disponiendo la vegetación siguiendo curvas de nivel, en fajas o en terrazas para cortar las líneas de escorrentía. Las prácticas radican en disminuir la longitud del declive efectivo para la escorrentía, y puede estimarse modificando el valor de 1, en el factor LS para calcular las tasas de erosión en los taludes de cada terraza, o introduciendo un valor de P adecuado para valorar las tasas de erosión de toda la ladera (Wishmeier y Smith, 1978).

Teniendo en cuenta que los factores R y K, no son modificables por el hombre, en la presente investigación se trabajó con coberturas vegetales, debido a su fácil manejo y eficiencia para prevenir y controlar la erosión; ya que cuando los procesos de erosión han iniciado, la pérdida de suelo tiende a ser irrecuperable y la estabilización requiere de gran inversión de tiempo esfuerzo

y dinero.

3.6. Importancia de la vegetación en la rehabilitación ambiental y estabilidad de suelos

Cuando las coberturas vegetales se establecen teniendo en cuenta la fisiología de la planta, naturaleza, reproducción, y sobre todo el efecto de las raíces, la probabilidad de estabilizar la pendiente y el control de erosión aumenta, ya que estas influyen en los procesos hidrológicos que determinan las condiciones de firmeza y modifican directamente las propiedades mecánicas del suelo. La vegetación arbórea y arbustiva presentan sistemas radicales de anclaje que se distribuyen en lo profundo del perfil y hacia los lados aumentando la resistencia a la ruptura generando estabilidad al terreno frente a los procesos derivados de la erosión (Rivera, 2011). El balance hidrológico del suelo depende en gran medida de la flora, ya que esta influye de manera directa en la interceptación, evaporación y transpiración, además la absorción de agua de las raíces reduce el agua del subsuelo. Investigaciones realizadas por Waldron (1977), O'Loughlin y Ziemer (1982), Flórez (1986), (1994), Krogstad (1995), Hoyos y Mejía (1999), Rivera (2001), Rodríguez (2017), han determinado que la flora generalmente tiene un efecto positivo en las propiedades mecánicas debido a la acción de refuerzo que ancla el suelo menos profundo al más profundo. La densidad de las raíces dentro de la masa del suelo y su resistencia a la tracción contribuye a mejorar la capacidad del suelo para resistir las cargas cortantes. La máxima resistencia a la tracción de las raíces, el tamaño y su distribución, se pueden utilizar para evaluar valores de refuerzo de raíz para ser utilizados en el análisis de estabilidad de una pendiente (Capilleri *et al.*, 2016).

El sistema radicular de la vegetación que se desarrolla en el espacio comprendido entre el nivel freático y la superficie da como resultado una dinámica de humedad en la que interactúan el suelo, la raíz y el agua debido a la combinación de efectos de la transpiración y la evaporación

(Gadi, *et al.*, 2016), lo cual resalta la importancia de la vegetación en la regulación hídrica siendo el área de las hojas así como la de las raíces y su densidad, claves para comprender la dinámica que se desarrollan en un sitio y su rehabilitación ambiental.

En un proceso de rehabilitación con coberturas vegetales que se desarrolla en situaciones de elevadas precipitaciones, la fuerte inclinación del terreno puede producir una disminución de la cantidad de agua disponible para las plantas que crecen sobre el talud; por el contrario, si la precipitación del lugar es poco importante, esta se acumula en las grietas y andenes de la pared y en tales situaciones pueden encontrarse especies más hidrófilas que las naturales del entorno, lo que destaca la importancia de realizar un estudio minucioso de la flora nativa que persisten en las laderas (Salas *et al.*, 2017), ya que a partir de estas se puede generar la repoblación inicial de la flora en las zonas afectadas, de tal manera que la adaptación y el recubrimiento tenga una mayor oportunidad de colonización. Narváez *et al.*, (2017), desarrollaron un estudio en Ecuador sobre el efecto de especies forestales nativas e introducidas en suelos degradados, encontrando como resultado, que las plantas introducidas presentaron valores deficientes en los indicadores biológicos del suelo, mientras que las nativas mostraron indicadores biológicos positivos, siendo este un factor clave para restaurar los ecosistemas degradados, así mismo encontraron que los arbustos fueron los de mayor desarrollo, y que la generación de la biomasa de la flora contribuyó de manera significativa a la activación biológica del suelo.

Soliveres y García (2019), realizaron el estudio de sucesión secundaria, interacciones biológicas y funcionamiento de las comunidades asociadas a taludes en el cual presentan los cambios en las interacciones planta-planta y planta-suelo en una cronosecuencia de 20 años en taludes de carretera bajo la recuperación de ecosistemas degradados. Se cuantificaron las asociaciones de fertilidad del suelo, reciclaje de nutrientes, resistencia a la erosión, composición

de plantas y microorganismos, obteniendo que las interacciones entre plantas no variaron de forma significativa entre taludes de 0 - 2, de 7 - 9 o de más de 20 años, pero sí lo hicieron en planta-suelo. Cuatro de las 15 variables analizadas (cobertura vegetal, contenido en P, relación C/N y composición de los microorganismos del suelo) llegaron a niveles semejantes a los del ecosistema natural de referencia. Variables como composición y riqueza de plantas, biomasa radicular, reciclado de materia orgánica, incrementaron de forma notable en el periodo de 0 - 2 a 7 - 9 años. Por lo anterior el entendimiento de la flora arbórea, y sus interacciones con el suelo contribuyen al desarrollo de técnicas para una recuperación completa del ecosistema degradado. Guo *et al.*, (2021), generaron evidencia empírica de que la multifuncionalidad del suelo se ve reforzada cuando existe biodiversidad aérea y subterránea durante la restauración natural que ocurre a largo plazo, estableciendo que se tienen mayores efectos positivos cuando se forman comunidades de plantas y bacterias, que cuando se desarrollan hongos.

Para la protección de un talud se debe conocer principalmente el tipo de suelo y material parental de origen, por lo cual un método para la protección y estabilización de un talud casajoso y meteorizado, consiste en realizar siembra directa con estolones de pasto estrella (*Cynodon plectostachyus*) o maní forrajero (*Arachispintoi*), evitando al máximo disturbar los sitios de siembra, de esta forma se logra el cubrimiento del talud en aproximadamente 6 meses; como complemento se clavan estacas vivas de nacedero (*Trichanthera gigantea*), matarratón (*Gliricidia sepium*) y leucaena (*Leucaena leucocephala*), entre otras.

Estas estacas se siembran entre 0,5 a 1 m entre ellas, y desde la base del talud hacia arriba, con el fin de conformar un entrecruce de raíces que permita reforzar por amarre, los materiales sueltos y generar un anclaje y cohesión mayor del talud (Rivera, 2001). La vegetación que invade los cultivos y prados se denomina como arvense, sin hacer una discriminación como buenas o

malas, aunque en Colombia como un término común las han llamado malezas, lo que ha generado destrucción permanente de la flora herbácea y arbustiva en forma indiscriminada, sin medir beneficios ni consecuencias, trayendo como resultado la denudación del suelo principalmente en zonas de ladera y taludes en las carreteras nacionales, los cuales al quedar expuestos al impacto de las lluvias y al arrastre por las aguas de escorrentía, causan erosión y disminución de la biodiversidad genética que conduce a un desequilibrio ecológico (Rivera, 1997).

De manera tradicional en la zona cafetera colombiana se ha realizado el control de arvenses mediante diferentes sistemas de desyerba, tales como el azadón, el machete y herbicidas postemergentes y de uso preemergentes especialmente, desprotegiendo totalmente los suelos de coberturas vegetales; tales sistemas han conducido a un desgaste permanente de la capa orgánica por la erosión, y por ende a la pérdida de productividad e incremento de los costos de producción (Rivera, 1999). Por lo anterior es de resaltar la importancia de trabajar con la regeneración natural vegetal en la rehabilitación de laderas. Siendo así que diferentes investigadores han establecido que la vegetación ejerce un efecto positivo sobre la estabilidad del suelo, debido a que las raíces sirven como anclaje y evitan el desplazamiento de los horizontes más profundos, reforzando el suelo mediante los entramados que forman.

En este sentido, coinciden: Waldron (1977), O'Loughlin y Ziemer (1982), Waldron y Dakessian (1981), Florez (1986), Abe y Ziemer (1991), Sidle (1991), Phillips y Watson (1994), Krogstad (1995) y Hoyos y Mejía (1999), con relación al efecto positivo que la vegetación ejerce sobre la estabilidad del suelo, justamente sobre las capas más superficiales, ya que conforma una malla nutrida de fibras resistentes que refuerza el suelo, brindándole estabilidad y manteniéndolo en su sitio, puesto que la raíz actúa como un anclaje en forma de columna, que evita el desplazamiento de los horizontes más profundos.

3.6.1. Efecto de la arquitectura de la raíz en la estabilidad de suelos poco profundos.

El estudio de Ng *et al.*, (2013), determinó cuatro arquitecturas de raíces típicas, las cuales se clasificaron como exponencial, triangular, rectangular y parabólica; estableciendo que la exponencial puede inducir la presión negativa más alta de agua de poro, mientras que la parabólica proporciona la más baja, en una condición dada. Dependiendo de los tipos de especies de plantas, la vegetación puede generar diferentes arquitecturas de raíz.

Liu y Feng (2016) estudiaron dos arquitecturas de raíz, exponencial y parabólica para investigar los efectos hidráulicos en la estabilidad de pendientes poco profundas, ellos encontraron que durante una hora de lluvia, la raíz exponencial tiene mayor capacidad que la parabólica para mantener la estabilidad de la pendiente, debido a la menor presión inicial de poros del agua inducida por la arquitectura de la raíz exponencial, diferencia que se pierde a medida que la lluvia es continúa.

Zhu *et al.*, (2017), determinaron que la longitud de la raíz, la posición y la orientación en una pendiente del suelo es aleatoria, pero que son elementos clave al evaluar la estabilidad de una pendiente con vegetación, ya que las raíces principales se extienden profundamente y brindan una alta resistencia a la tracción. También concluyeron que la estabilidad de la pendiente arraigada se mejora considerablemente al incorporar refuerzos de la raíz, lo cual afirma la importancia vital de la revegetación de la pendiente para la prevención y mitigación de deslizamientos de suelo poco profundos. Por lo tanto, el factor de seguridad depende en gran medida de la función que desempeñan la densidad de las raíces, condicionado por el espesor de la capa superficial del suelo.

La resistencia de la raíz es menor para diámetros grandes y superior para diámetros pequeños (Bischetti, 2000). Las raíces de menor diámetro tienen más celulosa que las raíces

de mayor diámetro, por lo tanto, se caracterizan por poseer una mayor resistencia (Genet *et al.*, 2005). El beneficio confiable de la cohesión aparente de las raíces de las plantas se limita a las profundidades superficiales, ya que la distribución de la raíz se concentra principalmente a 1 m de la superficie del suelo. El uso de un valor mejorado de la cohesión del suelo es apropiado para áreas de césped y arbustos donde la distribución de raíces finas con profundidad es consistente y fácil de definir (Norris & Greenwood, 2006)

3.7. Propiedades del suelo y la erosión hídrica

Se ha encontrado que la susceptibilidad del suelo a ser erosionado está relacionada con las características de los mismos. Wishmeier y Smith (1978) relacionaron tal susceptibilidad con la distribución de tamaño de partículas, el contenido de materia orgánica, el tipo de estructura y la permeabilidad del suelo. En suelos de la zona cafetera colombiana se encontraron relaciones entre la erosionabilidad y propiedades del suelo como la densidad aparente, la resistencia a la penetración y el diámetro medio ponderado (Ramírez *et al.*, 2009).

Lobo y Pulido (2006), expresan que la estabilidad estructural se puede valorar desde el punto de vista cuantitativo mediante índices estructurales tales como: densidad aparente, porosidad total, distribución de tamaño de poros, consistencia, y a través de la evaluación de estabilidad de agregados; esta última se puede determinar con base en el principio de que los agregados inestables se romperán con mayor facilidad que los estables cuando son sumergidos en agua o por el impacto de gotas, determinaciones que son útiles para valorar la susceptibilidad de un suelo a la compactación y erosión hídrica.

Un método que utiliza Cenicafe para abordar los efectos derivados de la erosión, como lo es una cárcava remontante, consiste en realizar un diagnóstico del sitio, localizar el problema, identificar las condiciones climáticas y de suelos, determinar la relación causas y efecto, para

posteriormente formular la medida que más se ajuste a las condiciones de campo, como por ejemplo la construcción de trinchos escalonados para disipar la energía del agua, la evacuación subsuperficial y de escorrentía, mediante filtros vivos de guadua, así como el involucramiento de coberturas verdes, con las cuales se miden los resultados de recuperación teniendo como indicativo el crecimiento inmediato de la vegetación espontánea, el rebrote posterior y establecimiento de los materiales vegetales utilizados en las obras de construcción de control de erosión (Rivera, 1998).

Rivera (1999) sugiere que cuando se presentan derrumbes en carreteras, se deben cortar las entradas de aguas de escorrentía e impedir las infiltraciones altas, así como sellar las grietas que se presenten y apisonarlas, suavizar las salientes para evitar desplomes y derrumbes potenciales, contar con un drenaje natural o construir uno artificial, para la evacuación rápida de las aguas y así evitar saturaciones y coladas de barro, canalizar las aguas centrales y laterales del derrumbe hasta el drenaje anterior, promover la vegetación tupida, rastrera y de porte medio para evitar el arrastre del suelo y favorecer el amarre del mismo, construir empalizadas, trinchos, postes de concreto enterrados y trabados, diques o muros de contención en gaviones, mampostería o concreto reforzado como obra de defensa. Las obras deberán tener buenos drenajes, en lo que se considera filtros, para evacuar el agua y evitar que el suelo sobresaturado rompa la estructura al sobrepasar los coeficientes de seguridad del muro; rellenar la banca destruida con subsuelo en capas de 30cm apisonadas en húmedo mediante pisón de madera o mecánico y seguirlo haciendo a medida que se asienta y compacta, cuando la banca no presente asentamientos.

Se debe tener en cuenta que los suelos desnudos exhiben una conductividad hidráulica más alta que la del compuesto de raíces con vegetación en todo el rango de succión (Buczko, *et al.*,

2007), debido en gran parte a la repelencia del agua por las raíces, lo que puede atribuirse a la obstrucción del flujo de agua en los espacios porosos del suelo y al cambio en su geometría. Ng *et al.*, (2013) y Scanlan & Hinz, (2019) generaron soluciones analíticas para calcular la presión del agua en los poros sobre una pendiente insaturada considerando diferentes arquitecturas de raíces para estados estacionarios y transitorios, los cuales dejan claro que el efecto hidráulico de diferentes arquitecturas de raíz en la estabilidad de laderas poco profundas aún tiene mucho que investigarse, pues no se comprende de manera total.

Chávez *et al.*, (2016), aseguran que el desprendimiento de terraplenes de carretera, tiene que ver con la capacidad de adsorción hídrica, por ello es necesario evaluar la capacidad que tiene cada suelo en la retención del agua, para determinar la susceptibilidad al movimiento, por lo cual, es conveniente estudiar la estabilidad volumétrica, la mecánica de suelos, la curva de retención, la variación de la permeabilidad, el flujo de agua, el clima de la zona, así como la inclusión de parámetros hidrológicos en los análisis de estabilidad, ya que la variabilidad que presentan las condiciones y características de los elementos que conforman la ladera e intervienen en su estado de equilibrio son consideradas un problema, bajo una complejidad marcada al momento de la estabilización (Jiménez, 2017). La conductividad hidráulica saturada es una propiedad clave para entender los procesos de infiltración y redistribución de agua en el suelo, así como la dinámica del movimiento de agua y solutos en el mismo, es de gran utilidad en el estudio de procesos erosivos y de contaminación del suelo (Gabriels *et al.*, 2006).

3.8. Mantos o mallas para el control de erosión

Existen diferentes tipos de mantos para el control de erosión en el comercio: los sintéticos (polipropileno) y los derivados de fibras naturales, como el fique y la fibra del coco, que en el mercado convencional resultan ser costosos tanto en producto como en instalación. Los mantos

temporales forman una matriz continua que provee protección contra la erosión y, en su proceso de descomposición, se integran al suelo sin afectarlo, presentan una longevidad funcional menor de 48 meses (Caicedo y Ardila, 2017). A continuación, se presenta una descripción de algunos estudios con fibras utilizadas como geotextiles para el control de erosión y desarrollo de coberturas.

Navdeep y Dipayan, (2018), realizaron un estudio utilizando ortiga y poli (ácido láctico) en diferentes proporciones de peso y determinaron que la resistencia a la tracción de los geotextiles disminuía con la adición de fibras de ortiga y presentaban mayor biodegradabilidad que las fibras de poli (ácido láctico), y cuando se enterraron los geotextiles exhibieron una pérdida de resistencia a la tracción, la fertilidad del suelo mejoró después de la biodegradación de las fibras. Lo que brinda la posibilidad de nuevos geotextiles no tejidos, prometedores para la estabilización de taludes.

George *et al.*, (2003), trabajaron en la creación de tejidos a partir de plumas de pavo adheridos con látex para su uso como tejidos de control de la erosión, como resultado obtuvieron un comportamiento similar a las telas comerciales probadas en términos de transmitancia de luz y agua. Estas aumentaron el contenido de agua en el suelo y disminuyeron la compactación. El inconveniente de la tela se presentó en la dificultad de manejo para la instalación en el sitio.

Bhattacharyya *et al.*, (2009), estudiaron la aplicación de geotextiles usando hoja de palma para el control de la erosión del suelo en taludes problemáticos, y encontraron que el uso de esteras geotextiles a partir de hojas de *Borassus aethiopum*, aplicadas a suelo desnudo, reducen la altura de salpicadura del suelo en un 51% y la erosión por salpicadura en 90%, lo que indica una efectividad alta.

Las investigaciones realizadas por Broda *et al.*, (2017), determinaron que la lana y sus

subproductos transformados en geotextiles sirven para la protección a corto plazo de pendientes pronunciadas en la regulación de deslizamientos y erosión hídrica con una duración mínima de una década. En periodos más largos el geotextil iniciará el proceso de descomposición liberando al suelo, compuestos orgánicos ricos en nitrógeno, que son efectivos para el crecimiento de la vegetación protectora.

Rubiliar (2017), aplicó biomantos de paja de trigo y malla raschel con 35%, 50% y 65% de sombra, en temporada de invierno midiendo el material erosionado y la cobertura vegetal, obteniendo como resultado que los implementados con 35% y 65% fueron deficientes en cuanto a la generación de cobertura vegetal, mientras que los de 50% de sombra, dieron mejores resultados presentando una cobertura de 67% al cabo de la octava semana, el talud desprotegido presentó el 71%, destacando que este tipo de biomanto presenta mayor efectividad en cuanto al control de erosión superficial.

Rodríguez (2017), analizó por primera vez la efectividad de la bráctea de la palma *Manicaria saccifera* como biomanto, encontrando resultados positivos en la contención de la erosión del suelo, desarrollo de la cobertura vegetal y biodegradación de la malla en un tiempo promedio de un año. Con este tipo de tela se pueden adecuar los espacios de entrada de luz a gusto, por lo cual los investigadores que realicen estudios con esta fibra deberán ajustarlos de acuerdo con las necesidades de las especies y del tipo de suelo que esté involucrado, puesto que a través de tensión manual se puede obtener diferentes porcentajes de sombra o entradas de luz. Lo que convierte a la *Manicaria saccifera* en una excelente opción para los procesos de rehabilitación ambiental.

Otros estudios relacionados, determinaron que los geotextiles de bonote o fibra de coco juegan un papel vital en los procesos de interacción suelo-agua como el control de la erosión, la

estabilización de diques, terraplenes, protección lateral, filtración, drenaje, refuerzo, separación y ayudan en la consolidación temprana de la arcilla, minimizando la posibilidad de fallas tempranas (Lekha & Kavitha, 2006); así mismo el geotextil de fibra de coco tratado con cal reduce la presión de hinchamiento en un 52,19% colocado en una capa, y un 81,89% en una doble capa. Ranganathan (1994), realizó un resumen de experimentos y aplicaciones de los geotextiles derivados de la fibra de yute (*Corchorus capsularis*), exponiendo en detalle su papel en el control de la erosión del suelo mediante revegetación, y se definió como una solución a corto plazo, que se destaca por su bajo costo.

En cuanto a mantas sintéticas, se encuentra el estudio realizado por Hernández (2021) a nivel de prototipo, en el que determinó que el uso de una geomalla híbrida no tejida aumenta el factor de seguridad un 10% (factor de seguridad máximo de 1.48; testigo 1,20.) en un talud con pendiente 1.7H:1V conformado por suelos expansivos, debido a que la presencia de esta, hace que haya liberación de poro y por ende disminución del contenido de agua en las capas centrales del talud, bajo la presión de la carga del suelo. El estudio se realizó bajo condiciones límite, del 90% de saturación, descartando variables como sol y viento

De acuerdo con los estudios anteriormente analizados, la cristalinidad y el tipo de celulosa determinan la efectividad del refuerzo de las fibras vegetales, asegurando resistencia mecánica y rigidez de las fibras además de influir en las propiedades higroscópicas de los materiales (Zakikhani *et al.*, 2014). En su libro “Natural fibres for geotextiles”, De Souza *et al.*, (2020) establecen que las organizaciones de investigación desarrollo deben adoptar un enfoque holístico y desarrollar geotextiles a partir de diferentes fibras naturales y sus mezclas, ya que además de beneficiar el futuro de los geotextiles naturales, impactarían de manera positiva la economía de los países en desarrollo, de esta manera se ampliaría la oferta de alternativas para el control y la

corrección de los impactos ambientales negativos derivados de la erosión del suelo.

A continuación, se describe dos tipos de mantos no convencionales, uno orgánico (*Manicaria saccifera*) y otra sintética (polietileno) utilizadas en la investigación de Rodríguez (2017), y que son base para el desarrollo del presente estudio.

3.8.1. *Manicaria saccifera*

Es una palma utilizada por los afrodescendientes y las comunidades indígenas en el Pacífico colombiano para la construcción de viviendas, con las hojas cubren los techos y elaboran velas, el agua de los frutos la consumen como alimento y medicina, y las brácteas son utilizadas por los indígenas para la elaboración de sombreros (Ledezma, 2011). En la tabla 1, se presentan algunas de las propiedades de la fibra de las brácteas de *Manicaria saccifera* en comparación con otro tipo de fibras naturales (Fiore, *et al.*, 2014), destacando su alto contenido de celulosa y lignina que le confieren mayor resistencia.

Tabla 1: Comparación de la composición de celulosa de *Manicaria saccifera* con otras fibras naturales

Fibra	Celulosa (%)	Hemicelulosa (%)	Lignina (%)
Jute	72	13	13
Sisal	78	10	8
Lino	81	16.7 - 20.6	3
Cáñamo	68	15	10
Fibra de coco	43	0.3	45
Palma de aceite	65	-	29
Piassava	31.6	-	48.4
Ferula	53.3	8.5	1.4
Alcachofa	75.3	-	4.3
Althaea	44.6	13.5	2.7
Arundo	43.2	20.5	17.2
<i>Manicaria s.</i>	74.1	12.0	31.1

Nota: Esta tabla fue adecuada a partir del cuadro de análisis de fibras de Fiore (2014), valorando la celulosa, hemicelulosa y lignina para realizar una comparación con la fibra de *Manicaria saccifera*.

3.8.1.1. Bráctea de la *Manicaria saccifera*. Los estudios realizados por Porras *et al.*, (2014), determinaron que la superficie longitudinal de la tela de la bráctea varía del exterior a la superficie interna en términos de la cantidad de lignina, cera, grasa, resina e impurezas, y que la microestructura de la fibra es la misma, tanto en la superficie interior y exterior. En la superficie exterior las fibras se aglomeran más que en la superficie interna, lo cual se atribuye al hecho de que la bráctea de la *Manicaria saccifera* es el material que encierra las flores de la palma (Figura 1).



Figura 1. Palma de *Manicaria saccifera* y bráctea fibrosa

3.8.2. Manto Sintético.

Una fibra polimérica es un polímero cuyas cadenas están extendidas en línea recta una al lado de la otra a lo largo de un mismo eje. Algunos de los polímeros que pueden ser empleados como fibras son el polipropileno, polietileno y los poliuretanos, entre otros (Quiroga, 2014). Para efectos del presente estudio, se trabajará con polietileno (polisombra) por ser un material de fácil adquisición, de alta densidad y resistencia, protección UV, muy utilizado como malla de sombra para invernaderos y viveros, debido a la climatización que genera y, se puede adquirir en diferentes porcentajes de entrada de luz. Por ser un material relativamente económico, se incluirá en la investigación, ya que los mantos que se utilizan en la recuperación de taludes y laderas son

en su mayoría de polipropileno cuyos productos derivados son costosos (Rodríguez, 2017).

3.9. Bioinsumos orgánicos para la estabilidad de la pendiente

3.9.1. Mucílagos y microorganismos.

La incorporación de mucílagos para estabilizar las pendientes (taludes) en bioingeniería ha sido estudiada por algunos autores como Clapp *et al.*, (2003); Rillig y Mummey, (2006) y Smith *et al.*, (2011); quienes determinaron que los exudados de raíces, bacterias y hongos influyen sobre las propiedades hidráulicas del suelo, ya que pueden generar cambios en su estructura, interviniendo en la capacidad de retención del agua y tamaño de los poros.

Schwartz *et al.*, (2016), reafirman que las variaciones espaciales y temporales en las propiedades hidráulicas del suelo pueden ser influenciadas por el mucílago. Así mismo, Carminati *et al.*, (2016), analizaron que la humedad del suelo con potenciales de agua negativos aumenta con la presencia de mucílago, y concluyeron que a pesar de que cuentan con imágenes tomadas en detalle de la dinámica del contenido de agua en la rizosfera, no comprendían completamente cómo la exudación del mucílago afectaba la absorción de agua de la raíz en diferentes ambientes del suelo. Por lo cual, solo establecieron que existe una conexión hidráulica entre las raíces y el suelo, pero que se necesitan más investigaciones para comprender el efecto del mucílago en las propiedades hidráulicas de las raíces de las especies que no son de cultivo para la estabilidad de la pendiente en bioingeniería.

Entender el comportamiento del mucílago y sus características es necesario para obtener una comprensión mecanicista de los procesos subyacentes que conducen a cambios en las propiedades del suelo (Brax *et al.*, 2019), por lo cual deberían contemplarse en los estudios de estabilización, ya que podría integrarse de manera sistémica a las alternativas de rehabilitación.

Ahmed *et al.*, (2018) determinaron que el mucílago proporciona propiedades similares a las de

las biopelículas que mantienen las actividades microbianas y exoenzimáticas, incluso bajo sequía. Al tener una lenta descomposición el mucílago mantiene condiciones de humedad alrededor de las raíces durante un período prolongado, lo que favorece las interacciones para la disponibilidad de agua, originando condiciones para la vida microbiana en la rizosfera y mejoramiento de la liberación de nutrientes para las raíces en situaciones de escasez de agua. En el presente estudio se evaluó el comportamiento del mucilago de *Aloe vera* en la estabilidad de muestras de suelo.

3.9.1.1. Mucílago de *Aloe vera*. Contiene entre el 98.5 y 99.5% de agua, integrado con más de 200 sólidos en los que se destaca los polisacáridos, glucoproteínas, antraquinonas fenólicas, flavonoides, enzimas, minerales, aminoácidos, esteroides, saponinas y vitaminas (Minjares y Femenia, 2016). El acemanano es el principal polisacárido del *Aloe vera*, compuesto por cadenas de manosa parcialmente acetiladas, seguidas de glucosa y galactosa, los cuales están involucrados en la interacción del polímero con otras biomoléculas, por lo que el acemanano se reporta como la principal sustancia bioactiva, pero que es inestable y puede ser degradada por cambios en el pH, exposición a altas temperaturas, contaminación bacteriana o actividad enzimática (Chokboribal *et al.*, 2015).

3.10. Influencia de la materia orgánica sobre las propiedades físicas y químicas del suelo

La materia orgánica es muy importante en los suelos, sobre todo en lo concerniente a la restauración ecológica de áreas degradadas, porque tiene la capacidad de reducir la densidad aparente del suelo y de mejorar su estructura, dándole estabilidad, ya que las sustancias húmicas contenidas favorecen la formación de agregados. Además, favorece la porosidad del suelo y aumenta el agua infiltrada, lo cual genera una adecuada relación agua-aire. El color oscuro de la materia orgánica también favorece la absorción

de las radiaciones solares, lo que eleva la temperatura del suelo y beneficia procesos biológicos como la germinación y la actividad microbiana. Constituye la mayor parte del complejo adsorbente y de cambio, lo que permite retener elementos nutritivos durante la mineralización y ejercer una acción directa sobre los procesos de persistencia, transporte, movilización, retención y biodisponibilidad de metales pesados y compuestos orgánicos tóxicos, además de mantener un nivel constante de pH (Tortosa, 2011). Para la estabilidad estructural de los suelos uno de los indicadores es la materia orgánica (MO), la cual se encarga de mantener las partículas minerales unidas, y que su efectividad depende en gran medida de su calidad, por lo cual es de mucha importancia considerar el compuesto orgánico que se incorpore a un suelo. (Pulido *et al.*, 2009). Teniendo en cuenta lo anterior a continuación, se describen los bioinsumos orgánicos que se utilizaron como enmienda en la presente investigación para evaluar la dinámica en el mejoramiento puntual del suelo.

3.10.1. Vermicompost y lombricultura

Una alternativa a los problemas de contaminación orgánica es la lombricultura, por ser una biotecnología que utiliza a una especie domesticada, la lombriz *Eisenia foetida*, la cual tiene la capacidad de procesar subproductos y desechos orgánicos como estiércoles, residuos domésticos, de cosecha, lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales y demás relacionados, generando a partir de ellos un humus de primer orden, que obedece a la excreta de la lombriz y que se ha denominado como vermicompost, el cual se utiliza fundamentalmente para mejorar los suelos. Cuando la lombriz consume el material semicompostado, transforma una tercera parte en masa corporal y la restante en humus, originando además la flora bacteriana que contribuye a la degradación de la

materia orgánica (Sihna *et al.*, 2008).

Vázquez y Loli (2018). Afirman que la incorporación de enmiendas orgánicas en forma de compost y vermicompost incrementan el porcentaje de MO en el suelo, reducen los rangos de variación del pH del suelo debido a su poder tampón, aumenta la disponibilidad de fósforo en el suelo, generan mayor porosidad al suelo y disminuyen la densidad aparente. Gomes y Rivera (1993), evidencian que una de las formas de conservación del suelo en fertilidad y sostenibilidad, es el enriquecimiento con procesos y materiales biológicos como el uso de compost y lombricompost a partir de *Eisenia foetida*, que actúan como acondicionadores físicos, y permiten una mayor expresión biológica de las plantas al favorecer el desarrollo de las raíces. En la presente investigación, el vermicompost se fabricó a partir del estiércol bovino y la pulpa de café, los cuales se definen a continuación.

3.10.1.1. Excremento bovino. Se considera un material de mayor generación, debido a la alta distribución de la ganadería por el departamento del Huila, el cual puede generar diferentes procesos de contaminación ambiental cuando no es tratado. Por lo cual en la presente investigación será utilizado como insumo debido a su alta cantidad y fácil manejo para la producción de mejoradores de suelo, bajo procesos de fermentación y transformación de la lombriz *Eisenia foetida*. Gracias a su menor compactación y acidificación, contiene enzimas que ayudan a facilitar la acción bacteriana al pasar por el tracto digestivo de la lombriz (Ávila, 2010) y, de donde se genera un vermicompost con un buen contenido de nutrientes. Para que el estiércol de bovino pueda ser asimilado fácilmente por el tracto digestivo de la lombriz, es necesario semicompostarlo, de tal manera que las altas temperaturas que este genera sean controladas y no generen afectaciones a las lombrices.

3.10.1.2. Pulpa de café. En la actualidad el departamento del Huila es el primer

productor de café de Colombia, y por ende el mayor generador de residuos de beneficio, lo cual representa un problema de contaminación para varios municipios del departamento. Para el presente proyecto, la pulpa de café se utilizó como materia prima para alimentar a las lombrices y obtener vermicompost teniendo como ejemplo que una finca que produzca 1000 arrobas de café pergamino seco al año, genera 25 toneladas de pulpa, la cual se puede manejar en áreas reducidas de 25m² de lombricultivo bajo una densidad pura de lombriz de 5 kg/m², de esta manera es posible manejar una tonelada de pulpa por m² (Dávila y Ramírez 1996).

3.10.1.3. Microorganismos eficientes (EM). Son un cultivo mixto de microorganismos benéficos naturales y sin manipulación genética presente en ecosistemas naturales, fisiológicamente compatibles unos con otros. Esta tecnología fue desarrollada en la década de los 80 por el Doctor Teruo Higa en Okinagua, Japón (Torres y Silva 2006). El uso de EM en la agricultura tiene muchos efectos benéficos, ya que promueve el buen desarrollo de las plantas, mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, promueven los procesos de transformación del material orgánico, entre muchos otros beneficios. Por todas estas cualidades, los EM y el humus líquido se tienen en cuenta como elemento base para el desarrollo de la cobertura vegetal en la rehabilitación de los suelos (Rodríguez, 2017).

Valencia, (2009) realizó un estudio en Santa María Distrito Federal (Brasil), para determinar la influencia de la biomineralización en las propiedades físico-mecánicas del perfil de un suelo tropical afectado por procesos erosivos, para lo cual identificó los microorganismos nativos de la zona objeto de estudio y luego determinó el mejor nutriente precipitador de carbonato de calcio sobre la microbiota nativa en un perfil de suelo tropical, obteniendo como resultado la identificación de 43 bacterias, e indicó que un medio con acetato de calcio, extracto de levadura y glucosa (nutriente B4), puede ser el más favorable para el proceso de precipitación de

carbonato de calcio. Por lo anterior la integración del nutriente con la biota del suelo genera un método que contribuye a mejorar las propiedades físicas, químicas, mineralógicas y mecánicas de los suelos estudiados y que se considera un avance en la biotecnología debido a que contempla la posibilidad de reducir los impactos ambientales y económicos causados por la aplicación de métodos convencionales. En investigaciones realizadas por Arrieta *et al.*, (2012), aplicaron la misma técnica para suelos de la ciudad de Medellín (Colombia) y determinaron que este tratamiento logró disminuir la erosionabilidad de los suelos, cuando son sumergidos en agua, dada la baja desagregación y dispersión que presentaron. La continuación del estudio con precipitación del nutriente B4 mediante microorganismos, permitió a Valencia *et al.*, (2014) concluir que el efecto de esta combinación genera estabilidad estructural, mejor comportamiento de agregados y menor deformidad de la masa del suelo, reafirmando la posibilidad de utilizar la técnica de biomineralización en el control del proceso de erosión.

3.11. Peso ecológico de las especies dentro del ecosistema herbáceo

En la evaluación ecológica de ecosistemas boscosos, las técnicas de estructura horizontal permiten generar procesos de valoración del comportamiento de los árboles individuales y de las especies en la superficie del bosque, dicho análisis puede hacerse a través de índices que expresen la ocurrencia de las especies, así como la importancia ecológica dentro del ecosistema, en donde se tiene en cuenta la abundancia, frecuencia y dominancia de las especies, cuya suma relativa genera el Índice de Valor de Importancia (IVI) formulado por Curtis y McIntosh en 1951 (Melo y Vargas, 2003). Basado en este método y con la experiencia en campo de haberlo calculado para varios estudios de biodiversidad y planes de aprovechamiento forestal, se identificó un isomorfismo para evaluar la dinámica de la regeneración natural de la flora herbácea; siendo así que los índices, de abundancia, frecuencia y dominancia que definen la

cobertura vegetal, se hallaron con la ayuda del análisis de imágenes de las unidades experimentales procesadas en el software *Image J*, (Rodríguez, 2017).

4. Metodología

4.1. Descripción del área objeto de estudio

La presente investigación se desarrolló en la finca El Kirpal, km 5 vía nacional, la Plata - Neiva, vereda Lusitania del departamento del Huila (Figura 2), en una ladera afectada por la construcción de una vía, además del uso inadecuado de la explotación agropecuaria y el mal manejo del transporte de las aguas. El sitio se encuentra en las coordenadas (N:02° 24' 47,9"; W:075° 51' 45,7"), a una altitud de 1530 msnm.

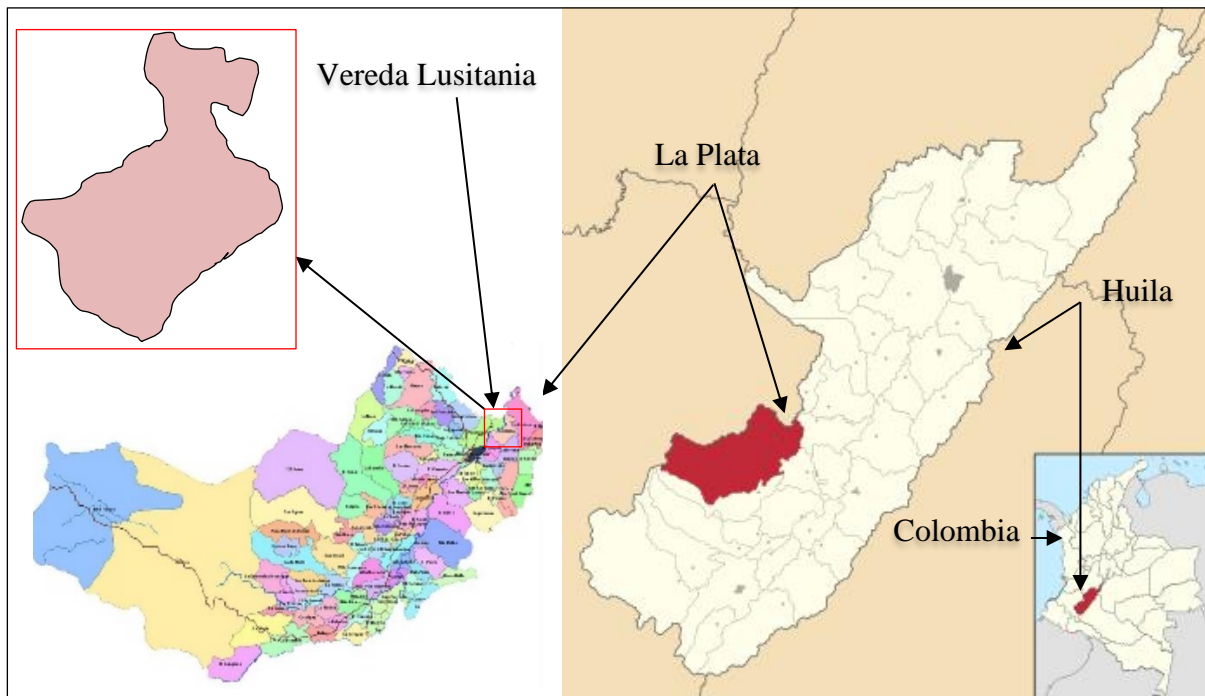


Figura 2. Ubicación del área de estudio.

De acuerdo con los datos de la estación meteorológica de la escuela del Instituto Agrícola del municipio de La Plata, la zona presenta una temperatura media anual de 23,7°C, con una máxima de 24.15 °C en el mes de febrero y una mínima de 17.08 °C en septiembre. La precipitación presenta una distribución bimodal, cuya media anual es de 1.590 mm (promedio de los años 2000 al 2021), con una máxima mensual de 205.3 mm en noviembre y una mínima de 43.6 mm en agosto. La evapotranspiración de referencia (ET_o) media anual es de 1.120 mm (calculada según

Thorntwaite). Los suelos de la zona están clasificados como alfisoles. No obstante, en la ladera bajo estudio se evidencia la decapitación parcial o total del horizonte superficial, aflorando a la superficie el horizonte argílico. La información adicional de la descripción general del suelo se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Descripción general de las condiciones del suelo de la ladera objeto de estudio

Unidad Cartográfica: Páez – La Plata	Material Geológico: metamórfico-sedimentario	Temperatura Ambiente: 23°C
Departamento: Huila	Evidencias de Erosión: Si	Distribución: Bimodal
Localización Geográfica: 02° 24' 9"N - 75° 45' 7"W	Vegetación Natural: Ocobo, Vainillo, Igua, Cachingo, Guácimo, Chambimbe, Yarumo, Bilibil	Material Parental: Arcillolitas del cuaternario
Posición Geomorfológica: Lomerío	Régimen Humedad suelo: Udico	Clase: Erosión por escorrentía, moderada a intensa
Vereda: Lusitania	Profundidad Efectiva: 40 cm	Uso Actual e Intensidad: Agropecuario
Municipio: La Plata	Humedad Actual del Perfil: Húmedo	Régimen Temperatura Suelo: Isohipertermico
Altura: 1030 msnm	Drenaje externo: Bien drenado	Limitante de profundidad: material rocoso
Forma: Ladera erosional	Epipedón: Umbrico	Clase Agrológica: IV
Relieve: Ondulado	Orden: Alfisol	Drenaje Interno: Imperfecto
Tipo de Topografía Vecina: Ondulada a inclinada	Taxonomía: Typic Paleudalfs	Horizonte. Subsuperficial: Argílico
Temperatura Edáfica: 25°C	Pendiente: > 16%	Suborden: Udalfs
Precipitación Anual: 1590 mm	Nivel Freático: No hay	

Nota: información adoptada del proyecto: Pedolarium del Huila

4.1.1. Descripción de los horizontes del suelo

A continuación, se presenta la descripción general de los horizontes del suelo de la zona objeto de estudio realizado en el proyecto pedolarium del Huila por: Torrente, (2022)

Ah 0 – 18 cm. Textura Arcillosa, estructura en bloques subangulares de tamaño grande a mediano, consistencia en húmedo muy plástico y pegajoso, duro en estado seco, densidad aparente 1,27 g/cm³, color en seco 10YR5/3, abundantes raíces gruesas y medianas, alta actividad orgánica, contenido de materia orgánica medio, alta saturación de bases y pH = 4,43 extremadamente ácido.

Bt 18 – 34 cm. Textura Arcillosa, estructura en bloques subangulares de tamaño grande a

mediano, consistencia en húmedo muy plástico y pegajoso, duro en estado seco, densidad aparente 1.30 g/cm^3 , color en seco 10YR5/3, moderada cantidad de raíces medianas y baja actividad orgánica, contenido de materia orgánica bajo, media saturación de bases y $\text{pH} = 4,47$ extremadamente ácido.

34 – 72 cm. Textura Arcillosa, estructura en bloques angulares de tamaño mediano a grande, en húmedo muy plástico y pegajoso, moderadamente duro en estado seco, densidad aparente $1,29 \text{ g/cm}^3$, color en seco 10YR4/6, escasas raíces finas, no se observa actividad orgánica.

C2 > 72 cm. Textura Arcillo Gravosa, estructura masiva, consistencia en húmedo plástico y pegajoso, densidad aparente $1,30 \text{ g/cm}^3$, color en seco 10YR6/6.

4.1.2. Características del suelo

Son suelos minerales del orden Alfisol de régimen de humedad údico que presentan un endopedón argílico bien desarrollado, con un porcentaje de saturación de bases medio, tienen una saturación de base mayor de 35% y los horizontes subsuperficiales muestran evidencias claras de traslocación de películas de arcilla (clay skins). Se encuentran formados en superficies jóvenes lo que les permite mantener reservas notables de minerales primarios, con capacidad de suministrar agua a las plantas mesófilas durante más de la mitad del año a lo largo de la estación de crecimiento (Torrente, 2022).

4.2. Fase 1. Preliminares. Modelo físico de arquitectura de raíz en muestras de suelos con diferentes clases texturales del área objeto de estudio

4.2.1. Selección, extracción, y análisis de muestras de suelo para pruebas preliminares

En el área objeto de estudio de la zona degradada, se procedió con una determinación al tacto de suelo y se seleccionaron tres clases texturales para la extracción de muestras, teniendo en cuenta que la textura es la variable que mejor caracteriza al suelo desde el punto de vista físico, y que la permeabilidad, consistencia, capacidad intercambio de iones, retención hídrica,

distribución de poros, infiltración y estructura, son algunas de las características del suelo que en gran medida dependen de ella (Gabriels y Lobo, 2006). Para esta fase se tomaron muestras de 10 kg de cada suelo con clase textural: Arcilloso, Franco arenoso, y franco, para realizar las pruebas de laboratorio, que conllevaron a los análisis preliminares de las muestras en combinación con las fibras orgánicas.

4.2.2. Adecuación de muestras y aplicación de tratamientos en las unidades experimentales (UE) preliminares.

4.2.2.1. Elaboración de arquitectura de raíz: Se trabajó con la fibra de fique (*Furcraea andina*) para la elaboración de las arquitecturas de raíz (Figura 3), teniendo en cuenta los resultados sobre la velocidad y tiempo de biodegradación de fibras naturales de Pinchao *et al.*, (2019). Para la ello se procedió de forma manual a desarrollar los diseños de arquitectura de raíz parabólica (fasciculada) y triangular (pivotante) con 48 hilos de fibra de 10 cm de longitud, obtenidos de un entramado de fique de 3,5 mm de diámetro y una masa total de 0,5 g.

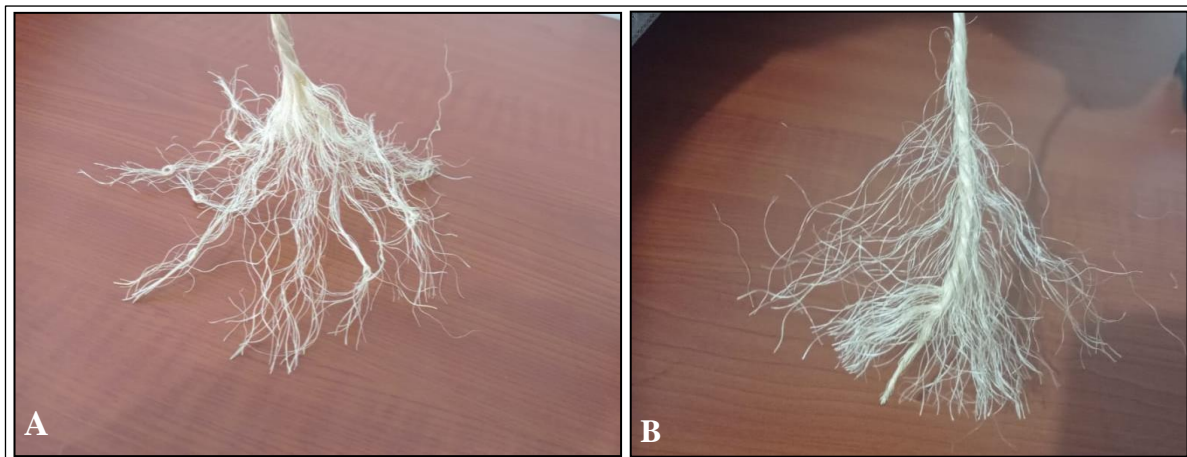


Figura 3. Modelos de arquitectura de raíz a) Arquitectura parabólica – fasciculada; b) Arquitectura triangular – pivotante

4.2.2.2. Diseño 3d, de las unidades experimentales. Para integrar las muestras de suelo con la arquitectura de raíz y mucilago de acuerdo con el tratamiento, se tomaron las arquitecturas

de raíz artificial en seco y se humedeció la fibra, aplicando de manera disgregada la muestra de suelo a una altura de 6cm y un diámetro de 9cm, moldeando a una forma piramidal como se puede ver en la figura 4.

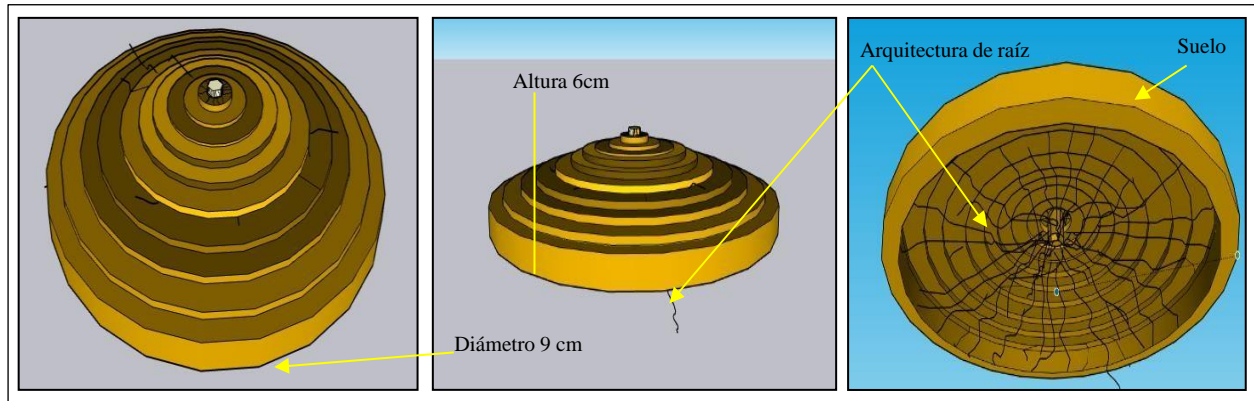


Figura 4. Diseño 3D de las unidades experimentales integradas con la arquitectura de raíz.

4.2.2.3. Integración de las arquitecturas de raíz con y sin mucilago a las muestras de suelo en laboratorio. El suelo disturbado de cada clase textural se secó al horno a 105°C, durante 12 horas y luego se pesó en una balanza de precisión, muestras de 200 gramos, paralela a esta actividad se procedió a colocar la arquitectura de raíz en el centro de una bandeja metálica, en donde se distribuyó las fibras secundarias en un diámetro de 9 cm, luego se humedeció la raíz con 2 cm³ de agua destilada y se aplicó la muestra de suelo por partes, hasta una altura de 6 cm, con una aplicación de 60 cm³ de agua. Para las muestras con tratamiento de mucilago de *Aloe vera*, el procedimiento fue similar, lo único que varió, es que en estas unidades experimentales la fibra fue humedecida con 2 cm³ de mucilago y no con agua. Las muestras testigo solo se moldearon con los 200 g de suelo y una aplicación de 60 cm³ de agua. Como se puede ver en la figura 5.



Figura 5. Construcción de las unidades experimentales en muestras de suelo, con mucílago y arquitecturas de raíz artificial.

4.2.3. Diseño de la investigación preliminar.

El enfoque de la investigación fue mixto y se inició como exploratorio, experimental en laboratorio. Se implementó un diseño factorial para cada una de las clases texturales de suelo objeto de estudio, Arcilloso, franco arenoso y franco. El factor 1, se refiere a la arquitectura de raíz con tres niveles de factor (A1. Triangular, A2. Parabólica y A3. Sin arquitectura); Factor 2. Correspondió al mucílago con dos niveles (M1. Con mucílago, y M2. Sin mucílago), por lo cual se aplicaron 6 tratamientos a cada clase textural de suelo (Tabla 3), con 3 repeticiones para un total de 54 UE.

Tabla 3. Tratamientos en cada clase textural del suelo

Factor	Muestra de Suelo Arcilloso			Muestra de Suelo franco- arenoso			Muestra de suelo franco		
	Unidad de factor			Unidad de factor			Unidad de factor		
Arquitectura de raíz	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3
Mucílago	M1	M2		M1	M2		M1	M2	
Tratamiento	T1: A1-M1	T2: A1- M2	T3: A2-M1	T1: A1-M1	T2: A1- M2	T3: A2-M1	T1: A1-M1	T2: A1- M2	T3: A2-M1
	T4: A2-M2	T5: A3-M1	T6: A3-M2	T4: A2-M2	T5: A3-M1	T6: A3- M2	T4: A2-M2	T5: A3-M1	T6: A3- M2

Nota: A1= arquitectura triangular; A2= arquitectura parabólica; A3= sin arquitectura; M1= con mucílago; M2= sin mucílago; T= tratamiento

4.2.4. Control y seguimiento de unidades experimentales (UE).

Las pruebas preliminares se realizaron durante 30 días, tiempo en el cual fueron sometidas a ciclos de humedecimiento y secado cada 3 días, mediante un sistema de riego por mangueras de 3/8” de diámetro, que distribuyeron el agua de forma homogénea y un secado a temperatura ambiente. Así mismo se realizaron pruebas para someter las muestras a esfuerzos mecánicos al aumentar el grado de inclinación de la base en la que se encuentra la UE a un ángulo de 60°, Para facilitar el estudio se diseñó un prototipo mecánico vertical de módulos giratorios con capacidad para 60 muestras de suelo (Figura 6). El material que se desprendía de cada muestra de suelo se secaba al horno y se procedía a obtener su masa en una balanza de alta precisión.

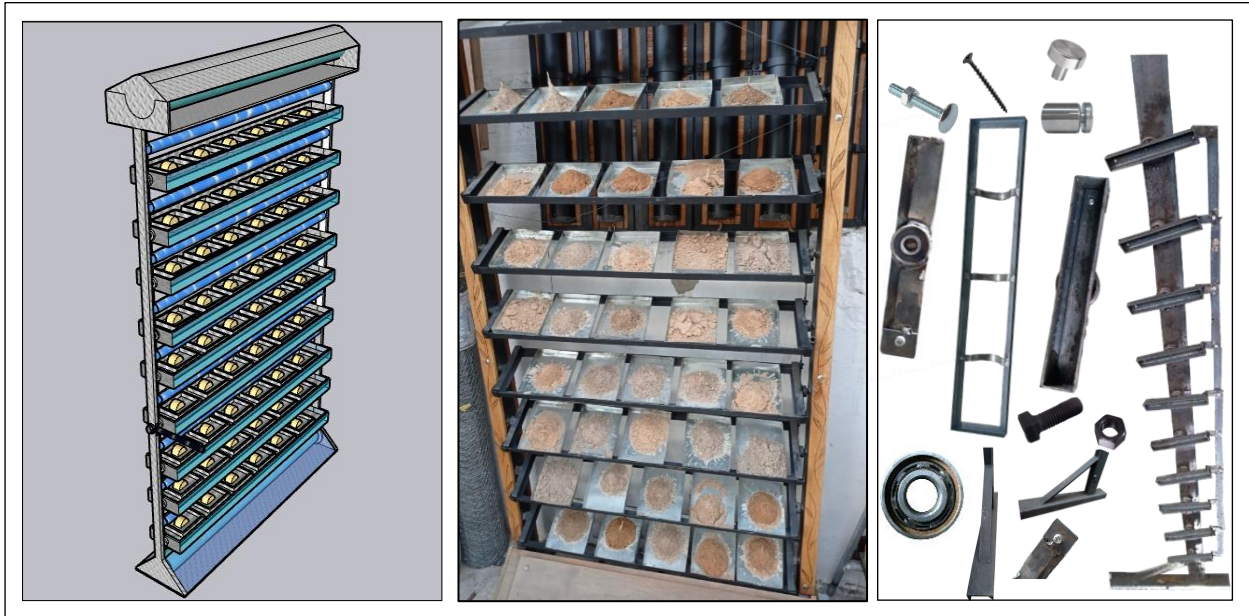


Figura 6. Prototipo vertical de modulos giratorios, para el manejo de las unidades experimentales de muestras de suelos.

4.2.5. Evaluación.

Mediante el software *Design-Expert*, se procesaron los resultados obtenidos de las UE sometidas a la prueba en laboratorio, para determinar la dinámica de los modelos físicos de arquitectura de raíz artificial en el suelo. En la figura 7, se presenta el resumen de las pruebas preliminares de la investigación.

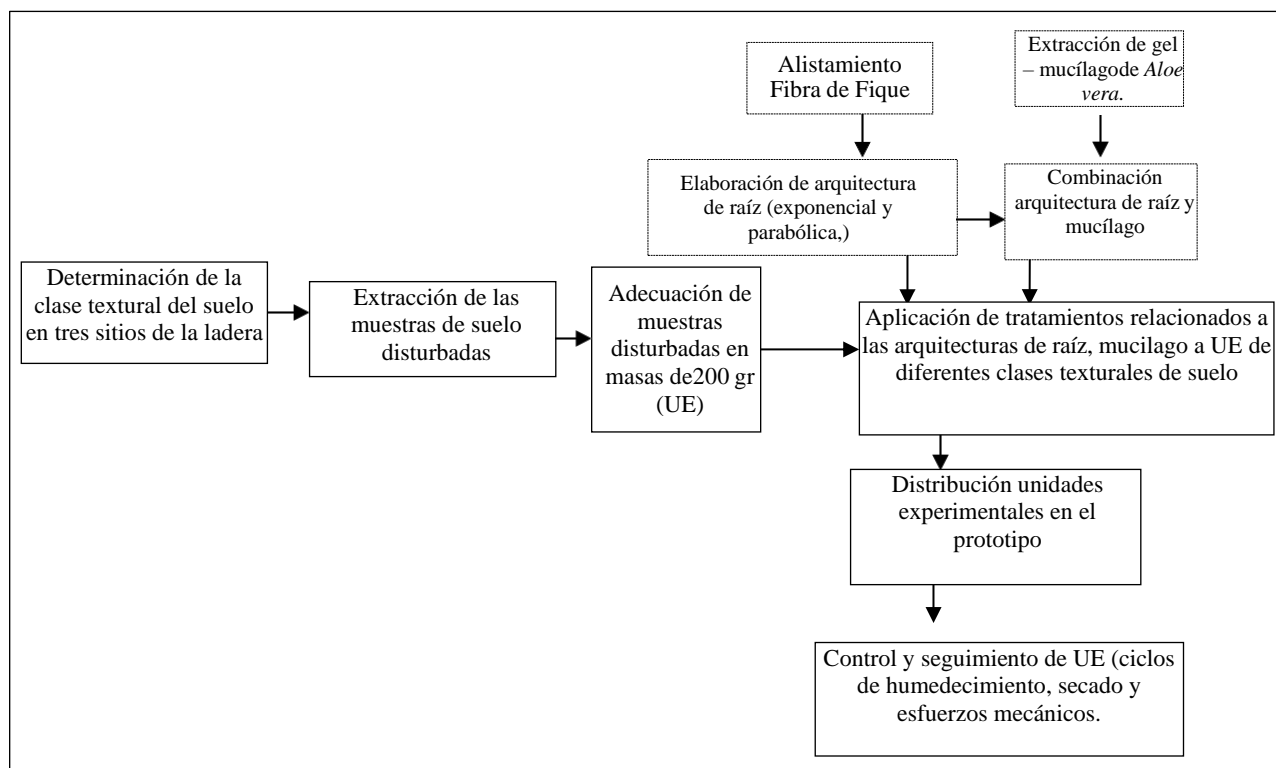


Figura 7. Diagrama de la fase preliminar de la investigación sobre la arquitectura de raíz artificial

4.3. Fase 2: Diagnóstico hidrofísico, biomecánico y ambiental del área degradada

La ladera que se eligió de área objeto de estudio se ubica al sur -oriente de la carretera nacional, vía La Plata – Huila. en donde el deterioro del suelo se manifestaba en la denudación por la acción del agua, con procesos de remoción en masa y erosión, situación similar a la que plantea Rivera *et al.*, 2015, que sucede en las zonas de montaña con procesos de degradación. y que la permanencia de los efectos fue constante durante un periodo superior a 10 años, teniendo en cuenta que el suelo se usaba para ganadería, y presentaba impactos ambientales negativos que a manera general se debían en parte, al efecto de la construcción vial. Por lo cual se realizó un diagnóstico del área de estudio (Figura 8), teniendo en cuenta la composición florística, las causas y efectos de la degradación de la ladera, la evaluación de impacto ambiental, el análisis hidrometeorológico, los parámetros del suelo, grado y longitud de la pendiente, las pérdidas de suelo y el índice de productividad.



Figura 8. Imágenes de la ladera objeto de estudio.

4.3.1. Composición florística.

Se realizó un inventario al 100 % de las especies arbóreas en 20 metros a la redonda de la zona objeto de estudio y se determinó la composición florística. En cuanto a la flora herbácea se realizó un reconocimiento general para la identificación de especies circundantes del área específica.

4.3.2. Impactos ambientales en la zona objeto de estudio.

Se determinaron los aspectos e impactos ambientales derivados de las actividades a las que había sido expuesta la zona objeto de estudio, teniendo en cuenta la participación de la comunidad en la reconstrucción de los eventos y profesionales del área Ambiental. se utilizó para la identificación y cualificación de los impactos, la matriz de causa y efecto (Leopold *et al.*, 1971), y la matriz de importancia. Cada impacto se calificó de acuerdo con la ecuación 4.

$$\text{Ecuación 4.} \quad I = 3IN + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC$$

Donde:

IN= intensidad

EX = extensión

MO= Momento

PE = persistencia

RV = reversibilidad

SI = sinergia

AC = Acumulación

EF = efecto

PR = periodicidad

RC = Recuperabilidad

La interpretación de cada una de las variables anteriormente mencionadas se puede ver en la

figura 9. Posteriormente se procedió a desarrollar las medidas de prevención, mitigación y control, por cada impacto negativo, las cuales fueron implementadas en la presente investigación.

Por variación en calidad	Intensidad del impacto (IN)	Extensión (EX) (Área de influencia)	Periodicidad (PR) (Regularidad de la manifestación)	Persistencia (PE) (Permanencia del efecto)
Impacto positivo +	Baja 1	Puntual 1	Irregular a periódico discontinuo 1	Indirecto 1
Impacto negativo -	Media 2	Parcial 2	Periódico 2	Directo 4
	Alta 4	Extenso 4	Continuo 4	
	Muy alta 8	Total 8		
	Total 12	Critica (+4)		
Reversibilidad (RV) (Por medidas naturales)	Efecto (EF) (relación causa/efecto)	Momento (MO) (Plazo de manifestación)	Recuperabilidad (MC) (reconstrucción por medios humanos)	Acumulación (AC) (Incremento progresivo)
Corto plazo 1	Indirecto 1	Largo plazo 1	Recuperable de manera inmediata 1	Simple 1
Mediano plazo 2	Directo 4	Mediano plazo 2	Recuperable a medio plazo 2	Acumulativo 4
Irreversible 4		Inmediato 3	Mitigable 4	
		Critico (+4)	Irrecuperable 8	

Figura 9. Valoración de impactos ambientales. Adaptado de la guía metodológica para la elaboración de una E.I.A. (Dellavedoya 2016).

4.3.3. Descripción del suelo y aislamiento de la zona objeto de estudio.

De acuerdo con el reconocimiento del sitio, la ladera se dividió por zonas, que correspondieron a:

- Cultivo: zona agrícola en la parte alta que no fue afectada de manera directa por los procesos de remoción en masa.
- Alta: zona en la que inicia los procesos de degradación por remoción en masa
- Media 1: zona de mayor inclinación en margen izquierda
- Media 2: zona de mayor inclinación en el centro de la ladera
- Media 3 Zona de mayor inclinación en margen derecha
- Baja: pie de la ladera

A continuación, en la figura 10, se puede apreciar la distribución de las zonas de la ladera objeto de estudio.

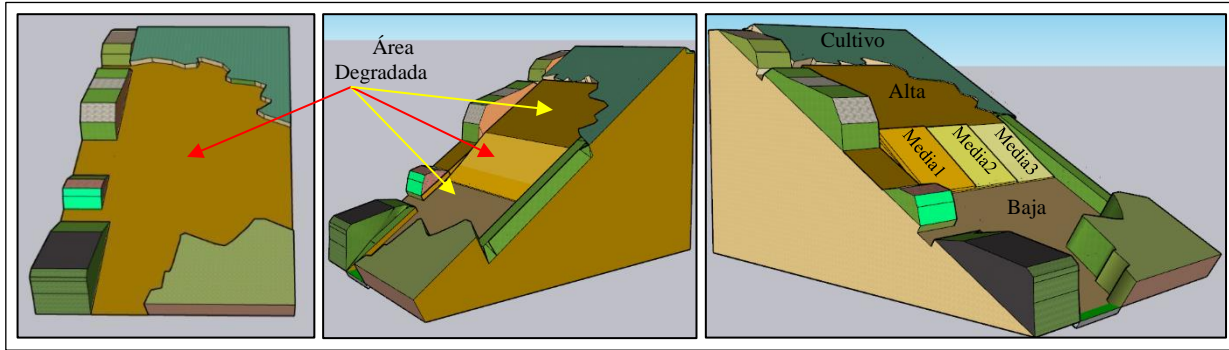


Figura 10. Esquema del área objeto estudio y clasificación de zonas de la ladera.

4.3.3.1. Cercado del área objeto de estudio. Para el aislamiento de la zona objeto de estudio se procedió con el encerramiento, mediante estantillos de guadua de 1.90 m de altura, distanciados cada 2 m y situados a una profundidad de 40 cm. Luego se realizó el templado de 3 líneas de alambre de púa calibre 14, por medio de templetes y asegurado con grapas (Figura 11). Lo anterior, con el fin de evitar el paso de ganado u otros animales que pudieran intervenir de manera negativa en el proceso de investigación.

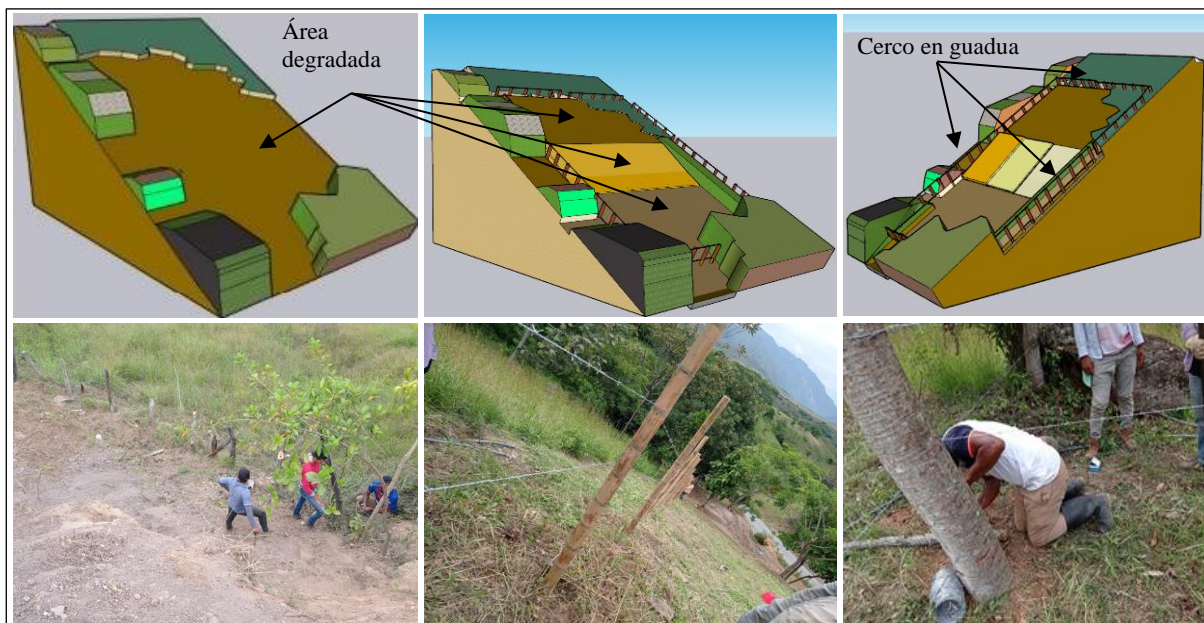


Figura 11. Encerramiento y limitación del área objeto de estudio.

4.3.4. Recolección de información en campo.

4.3.4.1. Toma de muestras de suelo. Se tomaron 4 muestras de suelo en cada una de las zonas de la ladera (Figura 12), a los 20 cm de profundidad, siguiendo los protocolos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2006). El muestreo fue sistemático y al azar, permitiendo ajustes durante las actividades de campo (Lozano, 2006). Se recolectó 15 kg por muestra disturbada, en bolsas ziploc con su respectiva codificación. Los métodos de evaluación visual del suelo se tuvieron en cuenta por ser una alternativa complementaria para evaluar la calidad estructural de suelos (Pulido *et al.*, 2014).

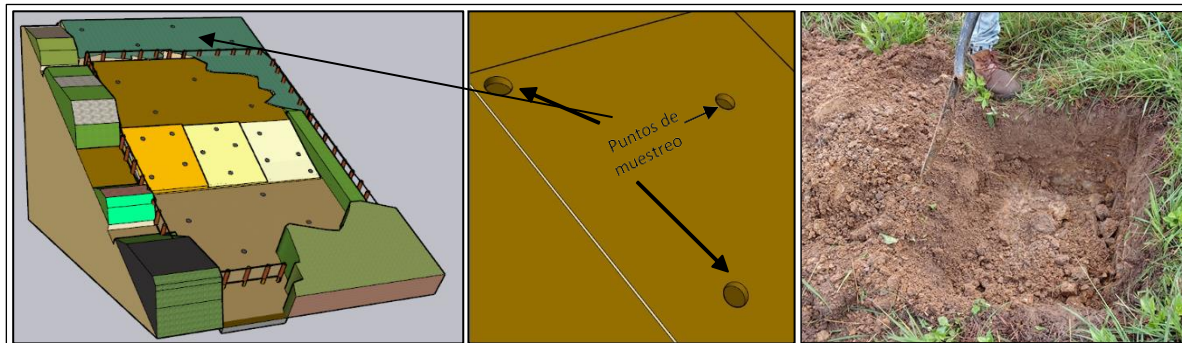


Figura 12. Esquema de los puntos de muestreo en las zonas de ladera.

4.3.4.2. Medición de la pendiente de las 6 zonas de la ladera. La pendiente se determinó en el campo utilizando cinta métrica, para hallar la longitud por tramos y nivel de manguera para mantener la distancia horizontal, luego se procedió a medir el cambio vertical mediante una mira de PVC para cada zona de la ladera. Seguido se procedió a hallar la tangente de la superficie dividiendo el cambio vertical en altitud entre la distancia horizontal. A continuación, se presenta las ecuaciones 5 y 6 con las que se determinó pendiente en porcentaje y en grados, respectivamente.

$$\text{Ecuación 5.} \quad P\% = \frac{h}{X} * 100$$

Ecuación 6. $P^\circ = ATAN \frac{P\%}{100}$

Donde:

P%= pendiente en porcentaje

h = Cambio vertical en altitud (cateto opuesto)

X = distancia horizontal (cateto adyacente)

P°= Pendiente en grados

4.3.4.3. Profundidad efectiva. con la realización de calicatas de 100 cm de longitud x 100 cm de ancho y 100 cm de profundidad, se procedió a medir con un flexómetro la profundidad a la que llegaban las raíces de las plantas, entendiendo que la profundidad efectiva de un suelo se refiere aquella en la cual no se detectan limitaciones físicas o químicas para el desarrollo de las raíces de las plantas

4.3.4.4. Infiltración. Se aplicó el método de doble anillo concéntricos en cada uno de los puntos de muestreo, midiendo la variación del nivel del agua en el cilindro interior. El infiltrometro de doble anillo se usa a menudo para medir las tasas de infiltración y ha sido descrito por Bouwer (1986). Ambos anillos se llenan de agua y se mide en el anillo interno la velocidad con la que el agua penetra en el suelo. cuando esta tasa se vuelve constante se alcanza la tasa de infiltración saturada o infiltración básica, la cual se asemeja a la conductividad hidráulica saturada, para el suelo en particular.

4.3.5. Análisis de las muestras de suelo en el laboratorio.

Para los análisis de las muestras de laboratorio se dirigió un proyecto de investigación para Ingeniería Agrícola denominado: “Evaluación del suelo en diferentes posiciones del paisaje de una ladera afectada por procesos de remoción en masa del municipio de La Plata Huila”, el cual tuvo un tiempo de duración de 10 meses para la tesis de pregrado (Maji y Duran, 2022). Esta investigación fue continuada aprovechando los resultados de laboratorio, y generando un análisis

de un mayor número de muestras de suelo y de zonas de la ladera (Cultivo, alta, media1, media 2, media 3 y baja), como insumo directo para la presente investigación conducente a la tesis doctoral. A continuación, se describe los procedimientos realizados.

4.3.5.1. Determinación de la humedad gravimétrica del suelo. Se tomaron aproximadamente 10 g de suelo de cada muestra (seco al aire), el cual se registró como peso húmedo, se llevó al horno a una temperatura de 105 °C, por un tiempo de 12 horas, seguido se ubican en el desecador, donde se atempero y se registró el peso final, y se procedió aplicar la ecuación 7, para determinar la humedad del suelo.

$$\text{Ecuación 7. } Ch = \left(\frac{msh - mss}{mss} \right) * 100$$

Donde:

Ch= contenido de humedad

mss = peso del suelo seco

msh = peso del suelo húmedo; mss = peso del suelo seco

4.3.5.2. Granulometría (distribución del tamaño de partículas). Para hallar la distribución del tamaño de partículas se realizó el método de Bouyoucos modificado (Day, 1965a; Pla, 1983; Forsythe, 1985; Gee y Bauder, 1986) el cual permitió la realización de lecturas en la suspensión con el hidrómetro estándar ASTM D 422, a los 0,5; 1; 3; 10; 30; 60; 90; 270; 720 min. Seguido se procedió a separar las fracciones de arena por tamizado, mediante los tamices de 1; 0,5; 0,25; 0,10 y 0,05 mm. Como dispersante se utilizó el hexametáfosfato de sodio al 10 % en agua, para alcanzar un pH 8,3, el cual se conoce comercialmente como Calgón (Pla, 1983). Luego se preparó un blanco en un cilindro al cual se le aplicó 50 cc del dispersante al 10 % y se agregó agua destilada hasta completar los 1000 cc; con ello se calibró el hidrómetro,

tomando la lectura en el sitio del borde superior del menisco, el cual correspondió a la lectura L_0 . El siguiente paso consistió en pesar 40 g del suelo tamizado, que luego fue llevado al horno a una temperatura de 105°C, para determinar el peso seco de la muestra, luego se tomó otra fracción de 40 g del suelo tamizado, y se vertió a un vaso de precipitado de 600 cc, agregando 50 cc de Calgón al 10% y 400 cc de agua destilada para realizar agitación mecánica. Luego se transfirió la suspensión con todos los residuos al cilindro de sedimentación y se completó el volumen de 1000 cc con agua destilada. Después se introdujo el agitador manual con un movimiento lento y repetitivo de arriba hacia abajo, desde el fondo al tope de la suspensión. Al final de la agitación se registró la hora de inicio de la prueba, se introdujo el hidrómetro y se tomó la lectura (L_1), transcurrido 30 seg desde la anotación inicial, Sin sacar el hidrómetro se registró otra lectura al cumplirse un minuto (L_2), así mismo se tomaron lecturas a los 3, 10, 30, 90, 270 y 720 min, con su respectiva medición de la temperatura. A cada lectura le correspondió un valor de (θ) como se puede ver en la tabla 4. La corrección por temperatura se realizó utilizando los valores de la tabla 5.

Tabla 4. Valores de θ correspondientes a las lecturas del hidrómetro (L) para DTP

L	θ	L	θ	L	θ
-4	50.1	12	46.2	27	41.9
-2	49.6	13	45.9	28	41.6
-1	49.4	14	45.6	29	41.3
0	49.2	15	45.3	30	41.0
2	48.7	16	45.0	31	40.7
3	48.4	17	44.8	32	40.4
4	48.2	18	44.5	33	40.1
5	47.9	19	44.2	34	39.9
6	47.7	20	43.9	35	39.5
7	47.4	21	43.7	36	39.2
8	47.2	22	43.4	37	38.9
9	47.0	24	42.8	38	38.6
10	46.7	25	42.5	39	38.3
11	46.4	26	42.2	40	38.0

Tabla 5. Correcciones por temperatura.

°C	
20	1,1180
21	1,1068
22	1,0955
23	1,0840
24	1,0724
25	1,0570
26	1,0488
27	1,0367
28	1,0247
29	1,0124
30	1,0000

Finalizado el proceso con el hidrómetro se procedió a transferir el contenido del cilindro de sedimentación al juego de tamices de 1; 0,5; 0,25; 0,1; 0,05 mm, forzando con agua el paso de las partículas con diámetro inferior al de los huecos del tamiz hacia los tamices siguientes. Luego se procede a recoger en recipientes individuales las arenas por cada tamiz y se procedió a llevar al horno a 105 °C, luego se pesaron las muestras en el orden A1, A2, A3, A4, A5 desde el tamiz de 1 mm al de 0,05 mm, respectivamente. Las ecuaciones de la 8 a la 15 fueron utilizadas en este proceso.

$$\begin{aligned} \text{Ecuación 8.} \quad \%Ps > 2 \text{ mm} &= \left(\frac{X}{Z}\right) * 100 \\ \text{Ecuación 9.} \quad \%Ps \text{ 1} - 2 \text{ mm} &= \left(\frac{A1}{b}\right) * 100 \\ \text{Ecuación 10.} \quad \%Ps \text{ 0,5} - 1 \text{ mm} &= \left(\frac{A2}{b}\right) * 100 \\ \text{Ecuación 11.} \quad \%Ps \text{ 0,25} - 0,5 \text{ mm} &= \left(\frac{A3}{b}\right) * 100 \\ \text{Ecuación 12.} \quad \%Ps \text{ 0,1} - 0,25 \text{ mm} &= \left(\frac{A4}{b}\right) * 100 \\ \text{Ecuación 13.} \quad \%Ps \text{ 0,05} - 0,1 \text{ mm} &= \left(\frac{A5}{b}\right) * 100 \\ \text{Ecuación 14.} \quad \% Pa &= \left(\frac{Ln - Lo}{b}\right) * 100 \\ \text{Ecuación 15.} \quad d(um) &= \left(\frac{\theta}{\sqrt{t}}\right) * \sqrt{\frac{n^{\circ}C}{n30^{\circ}C}} \end{aligned}$$

Donde:

% Ps = porcentaje de partículas de suelo

X = 200g iniciales del suelo menos el peso de partículas que pasaron por el tamiz de 2mm.

Z = los 200 gramos de suelo iniciales secos al aire.

b = resultado del peso final del suelo seco al horno pasado por el tamiz de 2 mm.

% Pa = porcentaje acumulativo

Lo = lectura de calibración del hidrómetro

Ln = lecturas realizadas con el hidrómetro (L1, L2, L3...)

d(um) = diámetro equivalente de partículas correspondiente a cada lectura

t = tiempo de sedimentación en min

4.3.5.3. Capacidad de intercambio catiónico. Para hallar este parámetro se utilizó el procedimiento de la Norma Técnica Colombiana (NTC) 5268 (Icontec, 2014). Para lo cual se pesaron 5 gramos de suelo seco al aire pasado por el tamiz de 2 mm, y se le adicionó 40 mL de solución de acetato de amonio a una concentración de 1 M y pH 7.0; se llevó a un agitador recíproco horizontal durante 30 min y se filtró; seguido se le agrego 50 mL de alcohol etílico al 95 % para eliminar el exceso de amonio. Luego en un nuevo vaso a la sustancia se añadió 50 mL de NaCl al 10 %; además se le adicionó 20 mL de formol con dos gotas de fenolftaleína para la coloración, y se realizó una titulación con hidróxido de sodio a 0.2 N hasta obtener un color rosado pálido, aplicando para los cálculos la ecuación 16.

Ecuación 16.
$$\text{CIC} \left(\frac{\text{cmol}}{\text{Kg}} \right) = \frac{(V-Bp) \cdot N \cdot (100+Pw)}{Pm}$$

Donde:

CIC = capacidad de intercambio catiónico

V= mL NaOH usados en la titulación de la muestra

Bp= mL de NaOH usados en la titulación de la muestra;

N= normalidad del NaOH;

Pw= % de humedad;

Pm= peso de la muestra (gr);

Pw= peso húmedo (gr)

4.3.5.4. Conductividad eléctrica. Este parámetro se determinó con la NTC 5596 (Icontec, 2008), para lo cual se utilizó una suspensión de suelo: agua constituida por una parte de suelo (pasado por el tamiz de 2 mm) por cinco de agua, 20 g de suelo se le agrego 100 mL de agua desionizada. Se utilizó un blanco del proceso con la misma cantidad y relación mencionadas. Luego se llevó a agitación en un agitador recíproco horizontal por un tiempo de 30 min. A continuación, se tomó los Erlenmeyer, papel filtro y un embudo para filtrar las muestras

tratando de que la mezcla de salida fuera transparente, seguido se tomó la lectura con el electrodo del conductímetro.

4.3.5.5. Densidad real o densidad de partículas. Este parámetro se obtuvo bajo la metodología del IGAC (2006), teniendo en cuenta la parte mineral. Las muestras fueron secadas en el horno por un tiempo de 12 horas y se halló el peso, después se tomaron 2 g de la muestra seca, y se pasó al picnómetro registrando su peso con tapa, posteriormente se adicionó agua destilada hasta 1/3 del volumen, luego se llevó al desecador por dos horas y se eliminó las burbujas de aire, seguido se adicionó agua destilada hasta un volumen de 2/3, después se le agregó agua destilada hasta llenar completamente el picnómetro, se tapó y seco, registrando el peso de cada una, y se procedió a desechar las partículas de suelo que se encontraban dentro del picnómetro dejándolo únicamente con la tapa y el agua, y se registró el valor para cada muestra de suelo. Para los cálculos se empleó la ecuación 17.

Ecuación 17.
$$DR = \frac{(pic+tap+sue)-(pic+tap)}{(pic+tap+ag-pic+tap)-(pic+tap+sue+ag-pic+tap+sue)}$$

Donde:

DR=densidad real;

pic= peso del picnómetro;

tap=peso de la tapa;

sue=peso del suelo;

ag= agua

4.3.5.6. Densidad aparente. Este parámetro se obtuvo mediante el método del cilindro de volumen conocido, para ello se procedió a tomar las medidas de cada cilindro biselado que se usaría, registrando su peso, diámetro y altura para conocer su volumen, luego se codifica cada uno y se procede a tomar las muestras de suelo inalterado verificando que estos quedaran

completamente llenos y que no se presentara compactación, seguido se procedió a colocar papel filtro, y a registrar el peso, se llevó al horno a una temperatura de 105 °C por 24 horas para extraer la humedad y hallar la masa del suelo seco, seguido se extrajo la muestra de cada cilindro y se ubicó en un desecador por 30 min, y se registró el peso seco, estos datos fueron aplicados en la ecuación 18.

Ecuación 18. $Da = \frac{Ps}{Vt}$

Donde:

Da= densidad aparente (g/cm³)

Ps= peso del suelo seco (g)

Vt= volumen total del suelo seco (cm³)

4.3.5.7. Carbono orgánico. Se obtuvo mediante oxidación húmeda de acuerdo con el procedimiento de la norma técnica colombiana (NTC) 5403 (Icontec, 2006), en donde se aplicaron las ecuaciones 19 y 20, para la lectura se usó el espectrofotómetro.

Ecuación 19. $COS = Lc * \frac{100+Pw}{Pm}$

Donde:

Lc = lectura de la muestra;

Pw = %de humedad;

Pm = peso de la muestra

Ecuación 20. $MOS = CO * 1,724$

Donde:

MOS=materia orgánica del suelo

COS= carbón orgánico del suelo

4.3.5.8. Determinación del pH. A cada una de las muestras de suelo de las zonas objeto

de estudio, se le determinó el pH, bajo la NTC 5264 (Icontec, 2008), lo cual se realizó con una relación 1:1, suelo-agua, con 20 g de la muestra de suelo seco al aire y pasada por el tamiz de 2 mm. Luego se adiciono 20 mL de agua des-ionizada, la cual se agitó por un minuto y se dejó estable por 30 min, para luego medir con el potenciómetro la lectura de pH y temperatura.

4.3.5.9. Estabilidad estructural. Para la obtención de este parámetro se utilizó el método de tamizado mecánico en húmedo (IGAC, 2006). Para ello se tomaron 100 g de cada muestra seca al aire y se pasaron por el tándem de tamices de 8 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm y 0,25 mm y se colocó en el agitador mecánico durante 2 min, luego se pesó la fracción retenida en cada tamiz, se registró el peso y se calculó la distribución de agregados en seco, se reunió toda la muestra obtenida en los tamices y se humedeció hasta capacidad de campo. Se colocaron 100 g de suelo a capacidad de campo en el tamiz superior (8 mm). Luego se activó el equipo de tamizado por 30 min, pasado ese tiempo se retiraron los tamices y se dejó drenar por 5 min. Después se vertieron las muestras retenidas en cada tamiz a frascos de precipitado de 250 mL y fueron llevados al horno durante 24 horas a una temperatura de 105 °C, seguido se procedió a registrar los pesos, y se colocaron las muestras en frasco tetero, se le adiciono agua destilada (50 %) un agente dispersante hexametáfosfato (10 mL) y se dispuso en una agitación mecánica por 30 min. Seguido se pasó cada fracción por cada tamiz correspondiente y se obtuvo las partículas primarias, en este proceso se aplicaron las ecuaciones 21, 22 y 23.

Ecuación 21.
$$P_{ss} = \frac{P_{sh}}{1+W}$$

Ecuación 22.
$$P_{sst}(\%) = \frac{P_{ssi}}{P_{ss}} * 100$$

Ecuación 23.

$$D. P. M = \sum_{i=1}^n \frac{Psst * Xi}{100}$$

Donde:

Pss = peso del suelo seco

Psh = peso del suelo húmedo

W = humedad del suelo

Pss t= (%) de agregados retenidos en cada tamiz

Pssi = (g) peso de los agregados del suelo seco en cada tamiz

Pss = masa total del suelo seco (g).

4.3.5.10. Límites de consistencia (Atterberg). Para la determinación de los límites de Atterberg se siguieron los protocolos del IGAC, (2006).

Límite plástico: se prepararon 5 g de pasta de suelo y se dejó secar hasta que dejó de adherirse a las manos, luego se amasó y se enrolló con los dedos sobre una lámina por un minuto, obteniendo un diámetro de 3 mm y se rompe en 7 pedazos, para seguir comprimiendo hasta obtener una masa uniforme y se continúa enrollando hasta que se fisuren. Luego los cilindros que se formaron de 6 cm de largo y 3 mm de diámetro se colocaron en una cápsula de humedad y se procedió a pesar. Seguido se llevan al horno a 105 °C durante 24 horas y se determina el peso seco, luego se procede a calcular el límite plástico que es igual al contenido de humedad, empleando para ello la ecuación 24.

Ecuación 24.
$$LP = \frac{Msh - Mss}{MSS} * 100$$

Donde:

LP = Límite plástico

Msh = masa del suelo húmedo

Mss = masa del suelo seco

Límite líquido: se pesaron 100 g de suelo por muestra, las cuales fueron tamizadas en la malla de 425 μm , luego se coloca el suelo sobre la lámina de acero y se adiciono 4 mL de agua destilada, al tiempo que se amasa hasta homogenizarla, y se continuo adicionando agua hasta obtener una mezcla cremosa, luego se tomó una porción de la pasta de suelo y se colocó en la cazuela de casa grande a nivel por debajo de un centímetro de profundidad sin que se generaran burbujas, seguido se dividió la muestra de suelo en dos mitades con la ayuda de un ranurador. Y se procedió a realizar dos golpes por segundo, hasta que las dos partes de suelo se unieran en el fondo de la ranura a una longitud de 1,2 cm y se registró el total del número de golpes. De la zona de unión se extrajo una submuestra para la capsula de humedad, se pesó y llevo al horno a 105 °C durante 24 horas, para luego calcular el contenido de humedad (CH), procedimiento que se repitió dos veces por cada muestra. Luego se graficaron los CH frente al número de golpes y se interpolo para hallar el CH a los 25 golpes (IGAC 2006). El límite líquido se halló mediante la ecuación 25.

$$\text{Ecuación 25.} \quad LL = \frac{M_{sh} - M_{ss}}{M_{SS}} * 100$$

Donde:

LL = Límite Líquido

Msh = masa del suelo húmedo

Mss = masa del suelo seco

Índice de plasticidad: el índice de plasticidad se determinó por la diferencia entre límite líquido y el límite plástico usando la ecuación 26.

$$\text{Ecuación 26.} \quad IP = LL - LP$$

Donde:

IP = Índice de plasticidad

LL = Limite liquido

LP = Limite plástico

4.3.5.11. Análisis estadístico del comportamiento de los parámetros del suelo en las diferentes zonas de la ladera degradada. Se realizó un diseño unifactorial completamente aleatorizado, teniendo en cuenta que se tomaron 4 muestras de suelo en campo por cada zona (cultivo, alta, media1, media 2, media 3 y baja). A cada parámetro se le realizó un análisis estadístico usando el software *Design-Expert*.

4.3.6. Análisis de los datos hidrometeorológicos.

Se consultaron las bases de datos del IDEAM y se analizaron los registros obtenidos de 22 años de la estación meteorológica de la escuela del instituto Agrícola, localizada a 3.5 km, de la zona objeto de estudio. Seguido con la ayuda del software Excel se procedió a realizar los cálculos de las precipitaciones medias mensuales y anual. Se determinó los índices de Fournier modificado (IFM 1 y IFM 2) mediante la ecuación 27, y el índice de concentración de la precipitación (ICP 1 y ICP 2) ecuación 28.

Ecuación 27.

$$IFM = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P}$$

Ecuación 28.

$$ICP = 100 \frac{\sum p_i^2}{P^2}$$

Donde:

p= es la cantidad de lluvia mensual

P= es la cantidad de lluvia anual

IFM 1: utiliza los valores de precipitación mensual promedio para un periodo determinado

IFM 2: se calcula el índice para cada uno de los años y promedia esos valores posteriormente

ICP 1: utiliza los valores de precipitación mensual promedio para un periodo determinado

ICP 2: se calcula el índice para cada uno de los años y promedia esos valores posteriormente

4.3.7. Estimación de las pérdidas de suelo.

Se determinó mediante la ecuación universal de pérdidas de suelo (modelo *RUSLE*), teniendo en cuenta la acción de los factores de precipitación, suelo, topografía, cobertura y prácticas de conservación. (Wischmeier, 1978). Para la estimación se utilizó la ecuación 1 (descrita en el apartado: 3.5).

4.3.7.1. Erosividad de la lluvia (R). Se determinó para conocer la influencia de la energía cinética de los eventos de lluvia sobre la erosión y se determinó mediante los criterios de la ecuación 2 (descrita en el apartado: 3.5.1.). En este caso como no se disponía de las bandas de los pluviógrafos, se utilizó la ecuación 29, desarrollada por Ramírez *et al.*, (2007) que utiliza los valores del índice de Fournier Modificado (IFM) para estimar el factor de erosividad de la lluvia. Ecuación 29.

$$EI_{30} = \sum_{1}^{12} 38,4(IFM) + 28,3$$

4.3.7.2. Erosionabilidad del suelo (K). se estimó utilizando la ecuación 30, con el propósito de cuantificar la erosionabilidad de cada suelo de las zonas objeto de estudio, mediante una expresión deducida experimentalmente y que representa la tasa de erosión del suelo por unidad de índice de erosión pluvial (González, 1991, Silva 1995)

Ecuación 30. $100K = 0,01317 [2,1 M1,14 10^{-4} (12-a) + 3,25 (b-2) + 2,5 (c-3)]$

Donde:

M: (% arena muy fina y limo) (100 - % arcilla).

a: % de materia orgánica.

b: código de tipo de estructura (granular muy fina = 1; granular fino = 2; granular grueso a medio = 3; blocosa, laminar, masiva = 4).

c: código del tipo de permeabilidad (rápida = 1; moderadamente rápida = 2; moderada = 3; lenta a moderada = 4; lenta = 5; muy lenta = 6).

4.3.7.3. Factor topográfico, LS. Se midió la longitud de la pendiente de cada una de las zonas de la ladera ya que esta influye considerablemente en las tasas de erosión del suelo, y los resultados se obtuvieron a partir de las ecuaciones 31 y 32:

Factor L.

Ecuación 31. $L = (\lambda/22,1)^m$

Donde:

λ = longitud de la pendiente

s: pendiente

m: derivado del gradiente de pendiente (s% >5, m= 0,5); (s% 3-5, m= 0,4); (s% 1-3=0,3); (s% <1-3, m =0,3); (s% <1, m= 0,2)

Factor S.

Ecuación 32. $S = 0,065+0,045s+0,0065s^2$

4.3.7.4. Cobertura, C. Uno de los resultados de la presente tesis es el desarrollo de coberturas, ya que, dependiendo del desarrollo o ausencia de estas, el suelo estará protegido o vulnerable a la fuerza erosiva de las precipitaciones, además del refuerzo mecánico que ejercen las raíces en la cohesión del suelo, por tal razón esta variable se tuvo en cuenta para la estimación de pérdida de suelos, con las coberturas obtenidas en la rehabilitación de la zona objeto de estudio.

4.3.7.5. Prácticas de conservación, P. Determina la influencia que tienen las prácticas de conservación de suelos sobre las tasas de erosión de un sitio y que es un factor de respuesta en los resultados del presente estudio.

4.3.7.6. CP máx. Valor máximo que podrían alcanzar los factores C y P en una Unidad de Tierra para mantener las pérdidas de suelo en los límites tolerables y se obtuvo mediante la ecuación 33. Para el cálculo del CPmáx, los valores de las pérdidas máximas se hacen iguales a la tolerancia (T) de pérdida de suelo, cuyos valores se asignan en función de la profundidad efectiva del suelo. En este caso se utilizaron los criterios de Mannering (1981)

Ecuación 33.
$$CP_{máx} = \frac{T}{R.K.L.S}$$

4.3.7.7. Análisis estadístico de las pérdidas de suelos. Se determinó los valores de los parámetros de la ecuación de la pérdida de suelos, para cada una de las zonas, con los cuales se implementó un modelo unifactorial, en donde se tomó como factor, las zonas de ladera, con 6 niveles de factor (cultivo, alta, media 1, media 2, media 3 y baja). Los datos fueron procesados mediante el software *Design-Expert*, y *Excel*.

4.3.8. Índice de productividad (IP).

El suelo en condiciones definidas de clima cultivo y manejo son factores concluyentes en el rendimiento del crecimiento vegetal, ya que estos generan un ambiente exclusivo para el crecimiento radical. Con el propósito de poder valorar los impactos de la erosión sobre la productividad del suelo, se implementó el modelo de Índice de Productividad desarrollado por Pierce (1983), bajo el protocolo propuesto por Delgado y López (1998). El cual se calcula mediante la ecuación 34.

Ecuación 34.

$$IP = \sum_{i=1}^n (A_i * B_i * C_i * K_i)$$

Donde:

IP: índice de productividad del suelo, valorado entre 0 y 1, en el cual el valor 1 representa un suelo sin limitaciones para el desarrollo de raíces.

4.3.8.1. Ai: Condiciones que regulan las relaciones agua – aire, del horizonte i.

Evalúa las condiciones que regulan las relaciones agua – aire del horizonte i, el cual se puede estimar por la capacidad de almacenamiento de agua disponible en el suelo (A1), o de la capacidad de aireación del suelo (A2). En este estudio se eligió el factor A2, y se realizó la valoración a partir del grado de estructura y los contenidos de arcilla de cada uno de los suelos, obtenidos a partir de las ecuaciones 35 - 40 que se muestran a continuación.

Estructura débil con un %arcilla \leq 20.	Ecuación 35.	$A2 = 1,0 - 0,01 (\text{Arc})$
Estructura débil con un %arcilla $>$ 20.	Ecuación 36.	$A2 = 1,2 - 0,02 (\text{Arc})$
Estructura Moderada con un %arcilla \leq 30	Ecuación 37.	$A2 = 1,0 - 0,007 (\text{Arc})$
Estructura Moderada con un %arcilla $>$ 30.	Ecuación 38.	$A2 = 1,3 - 0,016 (\text{Arc})$
Estructura Fuerte con un %arcilla \leq 40.	Ecuación 39.	$A2 = 1,0 - 0,005 (\text{Arc})$
Estructura Fuerte con un %arcilla $>$ 40.	Ecuación 40.	$A2 = 1,3 - 0,013 (\text{Arc})$

4.3.8.2. Bi: Resistencia mecánica para la exploración de las raíces. el Bi, evalúa las condiciones que determinan la resistencia mecánica para la exploración de las raíces, en el horizonte i. se puede valorar a partir de la condición de compactación del suelo (B1), o del contenido volumétrico de fragmentos gruesos (B2). en el presente estudio se seleccionó el subfactor B1, y se calculó a partir de la información de textura de suelo y la densidad aparente de cada una de las zonas de ladera, empleando las ecuaciones de la 41 a la 46, teniendo en cuenta que B1 es igual a = 1 si la densidad aparente (DA) es \leq 1,30 para cualquier textura.

Texturas finas con una DA entre (1,30 -1,40).	Ecuación 41.	$B1 = 3,6 - 2(\text{DA})$
Texturas finas con una DA entre (1,41 -1,60).	Ecuación 42.	$B1 = 6,4 - 4(\text{DA})$
Texturas Medias con una DA entre (1,30 - 1,55)	Ecuación 43.	$B1 = 1,9 - 0,7(\text{DA})$
Texturas Medias con una DA entre (1,56 - 1,80).	Ecuación 44.	$B1 = 6 - 3,33(\text{DA})$
Texturas gruesas con una DA entre (1,30 - 1,80).	Ecuación 45.	$B1 = 1,5 - 0,4(\text{DA})$
Texturas gruesas con una DA entre (1,81 - 2,00).	Ecuación 46.	$B1 = 8 - 4(\text{DA})$

Donde: DA = densidad aparente del suelo

4.3.8.3. Ci: Condiciones que regulan la fertilidad potencial. Se utilizó para evaluar las condiciones que regulan la fertilidad potencial del horizonte i, el cual se estimó a partir de la condición más limitante entre la reacción del suelo y el aluminio intercambiable (C1), o el contenido de materia orgánica del suelo (C2). Para el caso particular se eligió el C1, en cuyo cálculo se utilizaron los valores de pH de cada una de las zonas de ladera y luego se calculó el subfactor mediante las ecuaciones 47 – 53.

Para pH (< 2,8).	Ecuación 47.	C1= 0
Para pH (2,8 – 4,5).	Ecuación 48.	C1= 0,5 (pH) - 1,35
Para pH (4,6 - 5,5).	Ecuación 49.	C1= 0,45 + 0,1 (pH)
Para pH (5,6 - 7,0).	Ecuación 50.	C1= 1
Para pH (7,1 - 8,5).	Ecuación 51.	C1= 1,91 - 0,13 (pH)
Para pH (8,6 - 10,5).	Ecuación 52.	C1= 4,2 - 0,4 (pH)
Para pH (> 10,5).	Ecuación 53.	C1= 0

4.3.8.4. Ki: Importancia relativa. Evalúa la importancia relativa del horizonte i, para lo cual, en este estudio, se determinó la profundidad efectiva de los suelos en cada una de las zonas de ladera y se procedió a implementar la ecuación 54:

Ecuación 54. $Kacum = 0,024 * X^{0,82}$

Donde:

Kacum = Factor de ponderación acumulado hasta el horizonte i.

X = Profundidad máxima del horizonte i, (cm).

4.3.8.5. Diseño y análisis estadístico del IP en las 6 zonas de ladera. Se implementó un modelo unifactorial, en el cual se tomó como factor, las zonas de ladera, con 6 niveles de factor (cultivo, alta, media 1, media 2, media 3 y baja). Cada zona contó con 4 puntos de muestreo de suelo dispuestos completamente al azar, para un total de 24 unidades experimentales. Los datos fueron procesados mediante el software *Design-Expert*, y *Excel*.

4.4. Fase 3. Bioinsumos potenciales como tratamientos en la rehabilitación del área.

En esta fase se ensayaron los procesos para la obtención de las enmiendas orgánicas y la investigación de su validación con especies forestales para la rehabilitación de la zona alta y baja de la ladera. También se describen los mantos de *Manicaria sacifera* y polietileno, que, junto con la cobertura y el modelo de arquitectura de raíz seleccionado, se usaron como tratamientos para la rehabilitación de las zonas de mayor pendiente (media 1, media 2 y media 3).

4.4.1. Proceso de obtención de enmiendas orgánicas.

Para obtener las enmiendas orgánicas, se realizó la construcción de una biofabrica con materiales de la zona, estableciendo camas de producción para la transformación de los subproductos y residuos de mayor generación en el departamento del Huila, como fueron estiércol bobino y pulpa de café, que en el presente estudio se transformaron en mejoradores de suelo (compost y vermicompost) en presencia de microorganismos. Cada proceso se describe a continuación.

4.4.1.1. Construcción de biofábrica. Se estableció la instalación en un área rectangular de 5 x 8 m, utilizando como elemento estructural *Guadua angustifolia Kunt.* Se ubicaron postes como columnas cada 2,5 m, mientras que la cubierta se realizó con varillones de guadua protegida con zinc (Figura 13). La base de encierro se construyó con esterilla a una altura de 40 cm, colocando como paredes malla de polietileno.



Figura 13. Construcción de biofabrica

4.4.1.2. Camas para la producción de vermicompost. Se establecieron 10 camas rectangulares de 1 m de ancho x 2 m de largo y 0,5 m de alto, utilizando cilindros de guadua de 15 cm de diámetro asegurados con tornillos, tuercas y arandelas de 3/8". Cada cama se forró en su interior con plástico negro de alta densidad (Figura 14), y se ubicaron con una inclinación de 4 grados para facilitar el drenaje.



Figura 14. Camas para lombricultura en guadua y recubrimiento interno con plástico negro

4.4.1.3. Subproductos utilizados. Como materia prima para las enmiendas, se utilizó residuos orgánicos del beneficio de café (mucílago, cascarilla) y de ganadería (estiércol), como se muestra en la figura 15. Estos se eligieron por ser los de mayor generación en el departamento, de tal manera que se pudiera contribuir con la mitigación de impactos ambientales al transformar residuos potencialmente contaminantes en bioinsumos para el desarrollo de coberturas.



Figura 15. Residuos orgánicos de beneficio de café (A); estiércol bobino (B) y material orgánico semicompostado derivado de los dos subproductos anteriores (C).

4.4.1.4. Obtención de compost y vermicompost. La pulpa de café se composto parcialmente por 15 días antes de aplicarla a las camas de producción, mientras que el estiércol de bovino se acumuló en pilas y se maduró por 30 días. Pasado este tiempo se procedió a distribuir el material en las camas, con lo cual se obtuvo el compostaje a los 4 meses bajo la aplicación de microorganismos eficientes. Mientras que el vermicompost se obtuvo de tomar el sustrato semicompostado de 30 días, y hacer que fuera asimilado en la alimentación de la lombriz californiana *Eisenia foetida* (Figura 16). Las camas fueron cubiertas por una cortina de plástico con el fin de mantener la humedad en las dos enmiendas y evitar el estrés de las lombrices debido a que estas son fotosensibles. Se hicieron recircular los líquidos drenados del material orgánico, 5 veces en un periodo de 30 días. Cuando en el vermicompost las capas alcanzaron una altura de 30 cm desde la base de la cama, y el material fue completamente transformado, se procedió a separar la lombriz, mediante mallas trampa de polietileno con alimento nuevo en la superficie. Por último, se realizó la caracterización del compost y el vermicompost resultante.



Figura 16. Compost (A), vermicompost con lombrices (B), vermicompost final (C).

4.4.1.5. Microorganismos eficientes. Se obtuvieron de las raíces de plantas de limoncillo (*Cymbopogon citratus*), ortiga (*Urtica dioica*) y borraja (*Borago officinalis*) combinados con humus de bosque, luego se establecieron en una caneca de 189 litros donde se alimentaron con melaza, suero de leche y harina de trigo bajo un proceso de fermentación supervisado.

4.4.2. Validación de las enmiendas orgánicas con las especies forestales (*Jacaranda caucana pittier*, *Anacardium excelsum* y *Cariniana pyriformis*) para la rehabilitación de la zona alta y baja de la ladera.

Para la validación de las enmiendas orgánicas de compost y vermicompost en la parte alta y baja de la ladera, se dirigió un proyecto de investigación de pregrado en Ingeniería Agrícola, denominado: “Evaluación de la efectividad del compost y vermicompost en combinación con las especies forestales (*Jacaranda caucana*, *Anacardium excelsum* y *Cariniana pyriformis*) como técnica para la rehabilitación de áreas degradadas”, el cual tuvo un tiempo de duración de 10 meses para la tesis de pregrado (Falla y Suarez, 2023). Luego se continuo el proceso de seguimiento por 24 meses, como insumo directo de la presente investigación doctoral. A continuación, se describe de manera general la metodología que se utilizó.

4.4.2.1. Diseño experimental para validación de enmiendas orgánicas con tres especies forestales en la zona alta y baja de la ladera. Se realizó un diseño de bloques al azar, con 6 repeticiones para cada especie y se evaluaron 3 tratamientos (Tabla 6) con el fin de observar el comportamiento de cada especie frente a las enmiendas de compost y vermicompost, en la zona alta y baja de la ladera, evaluando un total de 54 unidades experimentales (Figura 17).

Tabla 6. Tratamientos implementados en tres especies forestales.

Subfactor	Especie 1. <i>Cariniana pyriformes</i>	Especie 2. <i>Jacaranda caucana</i>	Especie 3. <i>Anacardium excelsum</i>
Vermicompost	T1 -V1	T1 -V1	T1 -V1
Compost	T2 - C1	T2 - C1	T2 - C1
Sin enmienda	T3 - S1	T3 - S1	T3 - S1

Nota: T= tratamiento; T1-V1 = tratamiento con vermicompost; T2-C1 tratamiento con compost; T3S1= tratamiento sin enmienda.

4.4.2.2. Selección de especies forestales.

De acuerdo con el diagnóstico del área objeto de estudio, se buscaron especies forestales

nativas, con requerimiento de suelos similares y cualidades de buen desarrollo radicular, embellecimiento paisajístico y posible hábitat de fauna. Bajo estas premisas se seleccionaron las especies Gualanday (*Jacaranda caucana*), Caracolí (*Anacardium excelsum*) y Abarco (*Cariniana pyriformis*)

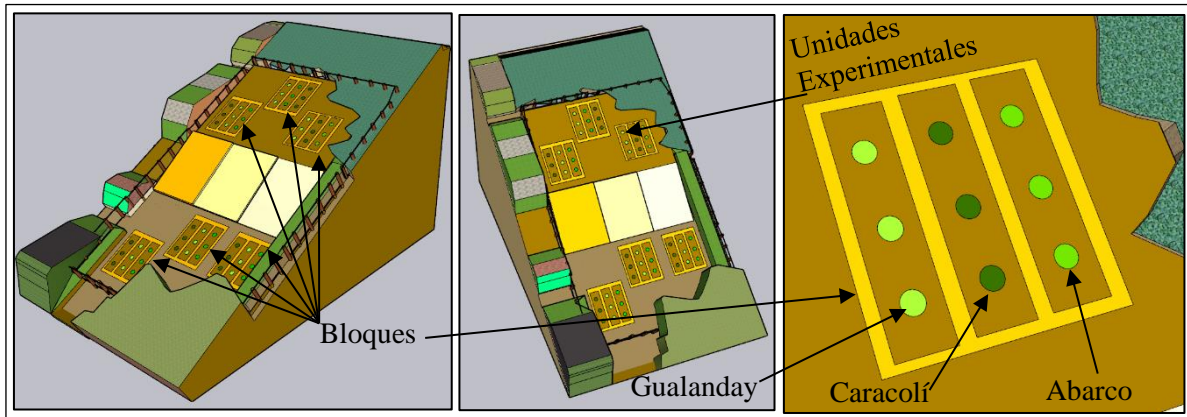


Figura 17. Distribución de los bloques en la zona alta y baja de la ladera objeto de estudio.

4.4.2.3. Establecimiento de unidades experimentales en la zona baja y alta de la ladera. Se realizaron hoyos de 100 x 100 x 100 cm a un distanciamiento de siembra 3 x 3 m, utilizando barras y palines. se aplicó 40 kg de enmienda en cada hoyo de acuerdo con el tratamiento a implementar (Figura 18). Las unidades testigo, solo contaron con los hoyos y fueron rellenadas con el mismo material que fue extraído. Las especies gualanday, caracolí y abarco fueron sembradas de acuerdo con el requerimiento del tratamiento.



Figura 18. Imágenes del establecimiento de las UE en la zona alta y baja de la ladera

4.4.2.3. Seguimiento y monitoreo de las unidades experimentales. A cada una de las UE se les realizó seguimiento de su desarrollo durante 24 meses, tomando las variables dasométricas del crecimiento en altura y diámetro, para lo cual se utilizó una regla de mira para medir la altura total y un pie de rey para determinar el diámetro, además se registraron las observaciones generales de cada especie (Figura 19).



Figura 19. Seguimiento del desarrollo de las especies forestales

4.4.2.4. Análisis estadístico. Se realizó un análisis estadístico para cada una de las especies forestales frente al comportamiento de la aplicación de enmiendas en la zona alta y baja de la ladera. la efectividad de los tratamientos fue evaluada mediante el software *Design-Expert*.

4.4.3. Mallas usadas como biomantos en los tratamientos.

A continuación, se describe el proceso de obtención de las mallas orgánica (*Manicaria saccifera*) e inorgánica (polietileno) que fueron usadas como biomantos en las UE.

4.4.3.1. Manto de polietileno. Estas se obtuvieron de un rollo entramado de hilos de polietileno con entradas de luz del 50 %, los cuales se cortaron a un área de 70 x 50 cm, cuyos detalles se pueden apreciar en la figura 20.



Figura 20. Obtención de manto de polietileno

4.4.3.2. Manto de *Manicaria Saccifera*. Se obtuvieron de la bráctea de la palma *Manicaria saccifera*, la cual fue aportada por integrantes de la comunidad afrodescendiente “Las Brisas del bajo Calima”. El proceso consistió en cortar las puntas de la bráctea y se procedió de forma manual a realizar un estirado de la fibra, hasta obtener una malla rectangular con área promedio de 3500 cm², (Figura 21).



Figura 21. Obtención de Manto de *Manicaria sacifera*.

4.4.3.3. Gramínea incorporada. Se seleccionó las semillas de *Hyparrhenia rufa*, como un factor en los tratamientos, teniendo en cuenta los estudios realizados por Rodríguez (2017), quien analizó que es una especie de alto valor ecológico y que además de generar una cobertura relativamente rápida, brinda condiciones para que especies provenientes de la regeneración natural, se puedan desarrollar. Las semillas se recolectaron al bordo de la carretera de la recta de Matanzas del municipio de Paicol en el departamento del Huila en donde estas presentaban alta abundancia.

4.5. Fase 4. Determinación de la efectividad de los tratamientos integrados para la rehabilitación ambiental del área degradada de mayor inclinación (zonas: media 1, media 2 y media 3)

4.5.1. Distribución de zonas y unidades experimentales (UE) en las zonas de la parte media de la ladera.

El área de mayor inclinación de la ladera se dividió en tres zonas de 50 m² que correspondieron a media 1 (suelo arcilloso), media 2 (suelo franco arcilloso) y media 3 (suelo franco), como se puede ver en la figura 22. En cada uno se ubicaron 72 unidades experimentales de 3500 cm² de área, correspondiente a 24 tratamientos por tres repeticiones, para un total de 216 UE.

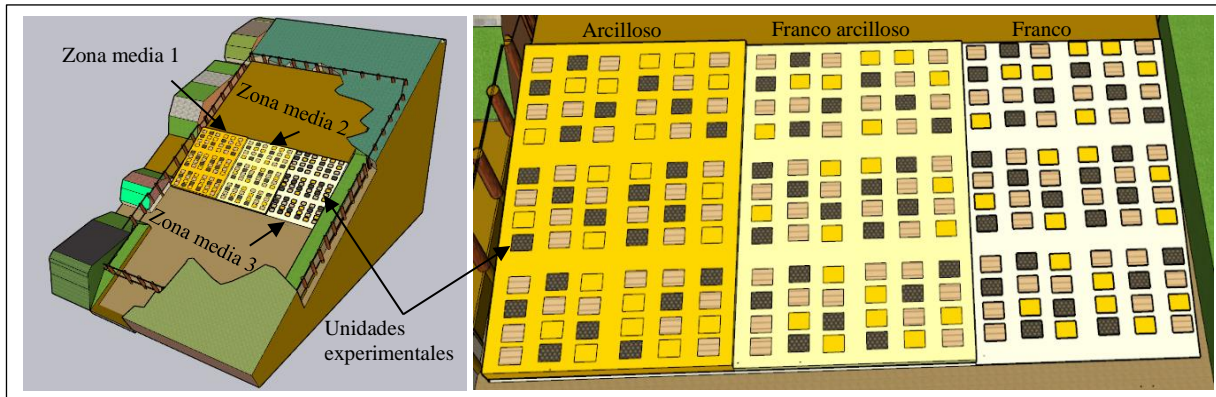


Figura 22. Distribución de unidades experimentales en las zonas media1, media 2 y Media 3.

4.5.2. Medición específica de pendientes en cada unidad experimental.

Con el fin de determinar la pertinencia de un factor de bloqueo para el diseño experimental, se midieron en campo las pendientes en todas las UE, usando como herramientas una regla de aluminio (codal), nivel metálico, plomada y decámetro. Se tomaron dos puntos: el más alto de la UE y el más bajo, se tomó el codal con un nivel de burbuja y se midió la distancia horizontal desde el punto más alto de la UE (X), con la ayuda de una plomada se trazó una línea vertical desde el plano horizontal del codal a el punto más bajo de la UE y se procedió a medir la altura (h) como se puede ver en la figura 23. Para el cálculo de pendientes en porcentaje y en grados se aplicaron las ecuaciones 4 y 5 explicadas anteriormente.

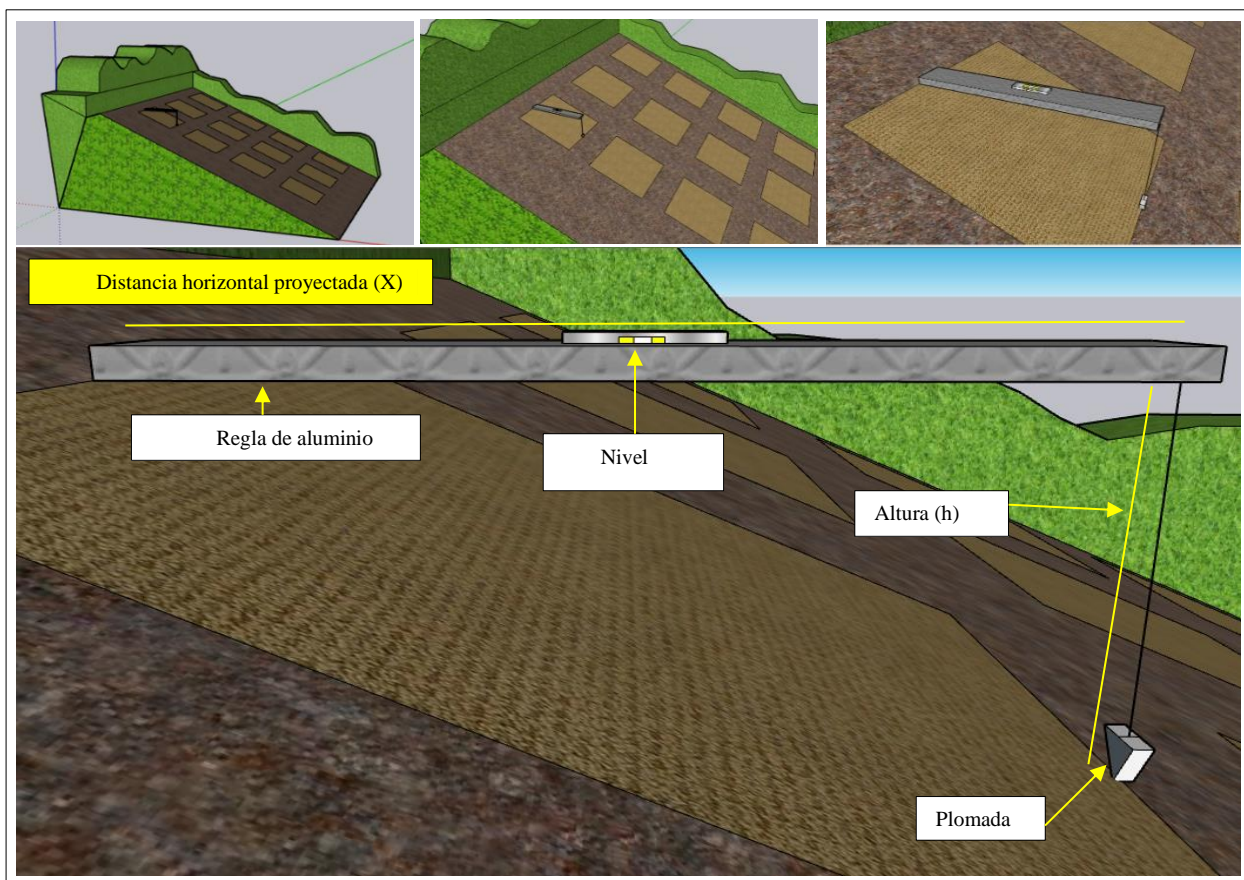


Figura 23. Procedimiento para la medición de pendientes de las unidades experimentales.

4.5.3. Diseño y aplicación de tratamientos para la rehabilitación integral del área degradada de mayor pendiente (media 1- arcillosa; media 2- franco arcillosa y media 3 - franco).

Se aplicaron 24 tratamientos con 3 repeticiones, es decir 72 unidades experimentales por zona de acuerdo con su clase textural que para el caso en particular fue: arcilloso, franco arcilloso y franco, estableciendo un total de 216 unidades experimentales. El diseño implementado fue bloques completamente al azar, donde el factor de bloqueo fue la pendiente: 40–55°; 56-70° y 71-85°. Los factores que se tuvieron en cuenta fueron gramínea con 2 niveles de factor (con gramínea y sin gramínea). Como factor 2 se tuvo en cuenta el modelo de raíz artificial (con raíz y sin raíz). El factor 3 fue la enmienda, con dos niveles de factor (con vermicompost y sin

vermicompost) y el factor 4, que se refiere a manto con tres niveles de factor (*Manicaria*, polietileno y sin manto). La distribución de los tratamientos se aprecia en la tabla 7. Se realizó un análisis de varianza para cada zona con diferente clase textural de suelo, realizando pruebas de comparación de medias tipo Duncan al 5 % de significancia, y se procedió a seleccionar los mejores tratamientos sistémicos teniendo en cuenta parámetros estadísticos tales como el coeficiente de correlación múltiple (R^2), error estándar de estimación, error absoluto y el valor estadístico P-Value.

Tabla 7. Tratamientos para la rehabilitación de áreas degradadas

Tratamientos para suelo con textura arcillosa. Zona media 1.		Tratamientos para suelo con textura franco arcilloso. Zona media 2.		Tratamientos para suelos con textura franco. Zona media 3.	
T1 = A1-G1-E1-V1	T13 = A1-G1-E1-V2	T1 = A1-G1-E1-V1	T13 = A1-G1-E1-V2	T1 = A1-G1-E1-V1	T13 = A1-G1-E1-V2
T2 = A1-G2-E1-V1	T14 = A1-G2-E1-V2	T2 = A1-G2-E1-V1	T14 = A1-G2-E1-V2	T2 = A1-G2-E1-V1	T14 = A1-G2-E1-V2
T3 = A1-G3-E1-V1	T15 = A1-G3-E1-V2	T3 = A1-G3-E1-V1	T15 = A1-G3-E1-V2	T3 = A1-G3-E1-V1	T15 = A1-G3-E1-V2
T4 = A1-G1-E2-V1	T16 = A1-G1-E2-V2	T4 = A1-G1-E2-V1	T16 = A1-G1-E2-V2	T4 = A1-G1-E2-V1	T16 = A1-G1-E2-V2
T5 = A1-G2-E2-V1	T17 = A1-G2-E2-V2	T5 = A1-G2-E2-V1	T17 = A1-G2-E2-V2	T5 = A1-G2-E2-V1	T17 = A1-G2-E2-V2
T6 = A1-G3-E2-V1	T18 = A1-G3-E2-V2	T6 = A1-G3-E2-V1	T18 = A1-G3-E2-V2	T6 = A1-G3-E2-V1	T18 = A1-G3-E2-V2
T7 = A2-G1-E1-V1	T19 = A2-G1-E1-V2	T7 = A2-G1-E1-V1	T19 = A2-G1-E1-V2	T7 = A2-G1-E1-V1	T19 = A2-G1-E1-V2
T8 = A2-G2-E1-V1	T20 = A2-G2-E1-V2	T8 = A2-G2-E1-V1	T20 = A2-G2-E1-V2	T8 = A2-G2-E1-V1	T20 = A2-G2-E1-V2
T9 = A2-G3-E1-V1	T21 = A2-G3-E1-V2	T9 = A2-G3-E1-V1	T21 = A2-G3-E1-V2	T9 = A2-G3-E1-V1	T21 = A2-G3-E1-V2
T10 = A2-G1-E2-V1	T22 = A2-G1-E2-V2	T10 = A2-G1-E2-V1	T22 = A2-G1-E2-V2	T10 = A2-G1-E2-V1	T22 = A2-G1-E2-V2
T11 = A2-G2-E2-V1	T23 = A2-G2-E2-V2	T11 = A2-G2-E2-V1	T23 = A2-G2-E2-V2	T11 = A2-G2-E2-V1	T23 = A2-G2-E2-V2
T12 = A2-G3-E2-V1	T24 = A2-G3-E2-V2	T12 = A2-G3-E2-V1	T24 = A2-G3-E2-V2	T12 = A2-G3-E2-V1	T24 = A2-G3-E2-V2

Nota: V1 (con gramínea); V2 (sin gramínea); A1 (con raíz artificial); A2 (sin raíz artificial); G1(manto de polietileno); G2 (manto de *Manicaria saccifera*); G3 (sin manto); E1 (con vermicompost); (E2: sin vermicompost).

4.5.3.1. Implementación de los tratamientos en las unidades experimentales. Se

utilizó para el montaje de las unidades experimentales en la zona de estudio, de mayor pendiente, un equipo de trabajo seguro en alturas que corresponde a cuerdas, cintas de anclaje, mosquetones, arnés, descendedor y eslingas (Ver imagen A, B y C de la figura 24). Los tratamientos en cada UE se implementaron de arriba hacia abajo en la ladera (ver imagen D, E y F de la figura 24), los mantos se prensaron con alambre en forma de U y se ubicarán cada 10 cm; seguido se colocaron 2 soportes de láminas de guadua de 2 cm de ancho, por 50 cm de largo

sobre los bordes inferior y superior.



Figura 24. Equipo de trabajo en alturas (A,B y C), montaje de tratamientos en las unidades experimentales (D,E y F)

4.5.3.2. Marcación de las unidades experimentales. A cada UE se le asignó un código que correspondió al tratamiento y la repetición, la cual se marcó en una lámina de aluminio de 20 cm² y se ubicó en una estaca de madera de café a 15 cm de altura para facilitar su identificación en campo (Figura 25).

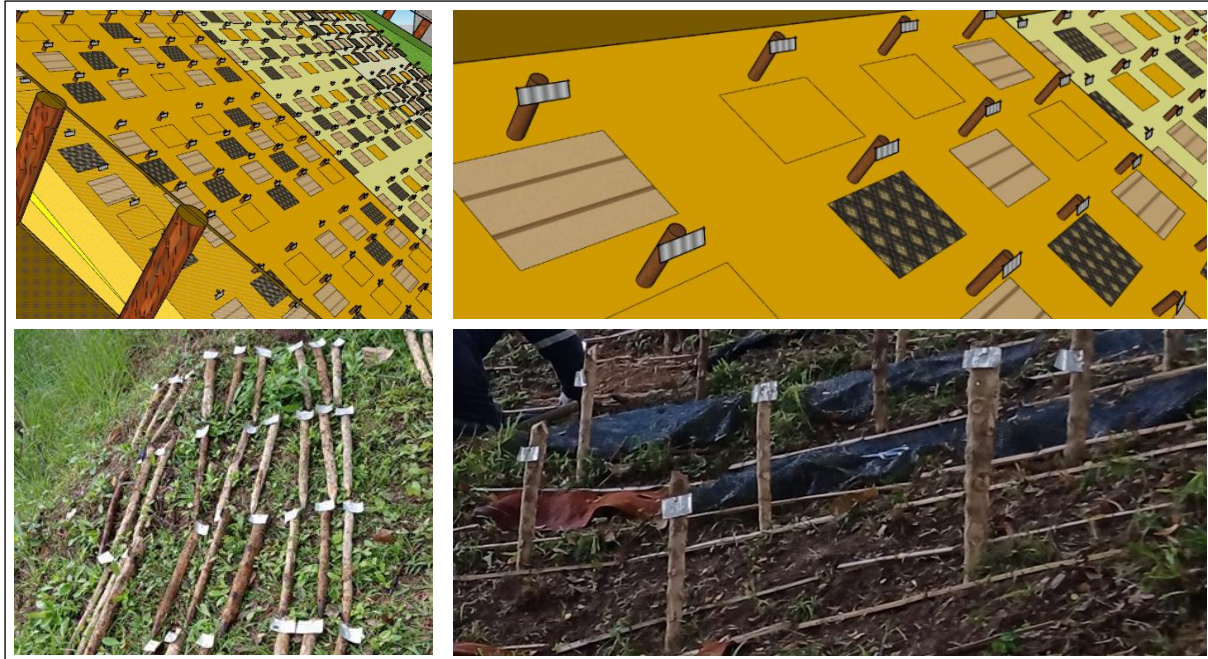


Figura 25. Marcación de las unidades experimentales

4.5.3.3. Perforaciones. Se realizaron 12 perforaciones de 1" de diámetro de 40 cm de profundidad con taladro, de acuerdo con el requerimiento de la UE (Figura 26), con distancias de 15 cm, en los cuales se procedió a ubicar los bioinsumos en relación con el tratamiento



Figura 26. Perforaciones para las unidades experimentales

4.5.3.4. Implementación de la raíz artificial. Con la ayuda de una línea de vida, se procedió a ubicar las raíces artificiales de fique en cada uno de los hoyos a una profundidad máxima de 40 cm desde la superficie (Figura 27). Para facilitar el proceso se utilizó un tornillo de media pulgada de diámetro para ingresar cada fibra y luego se procedía a eliminar los espacios mediante el sustrato que indicara el tratamiento.



Figura 27. Alistamiento de la raíz artificial (A y B), incorporación de raíz artificial al suelo (C).

4.5.3.6. Llenado de hoyos con bioinsumos (enmienda orgánica). De acuerdo con el requerimiento de la UE, los hoyos de 1” de diámetro, se llenaron de forma manual con 200 gramos de vermicompost para un total de 2,4 kg por cada UE.

4.5.3.7. Vermicompost líquido y microorganismos. Se procedió a mezclar en proporción de 50 –50, en un volumen de 5000 cm³ disuelto en 20 litros de agua, y se realizaron 3 riegos durante la primera semana de establecidas en las UE, sobre el área de estudio (Figura 28).



Figura 28. Vista de planta y de perfil de las unidades experimentales en la parte media de la ladera (fuente: Octavio clavijo Cabrera).

4.5.4. Control y seguimiento en las unidades experimentales.

4.5.4.1. Identificación y conteo de la cobertura vegetal en las unidades experimentales. Se procedió a realizar una evaluación de la cobertura herbácea que se generó en cada UE sobre la superficie de los mantos y se registraron en planillas del software Excel, teniendo en cuenta que, en las primeras semanas, la cobertura vegetal estaba muy joven y era complejo su identificación, la identificación se realizó solo cuando la planta presentó un estado de desarrollo que permitía el correcto reconocimiento, para ellos se analizaron los registros fotográficos y su confirmación en campo mediante el método utilizado por Rodríguez (2017), el cual consistió en dividir la UE en 9 partes como se muestra en la Figura 29 y se realiza el seguimiento en el cuadrante hasta reconocer las especies que se desarrollaron en él.



Figura 29. Cuadrícula de la UE para el seguimiento de la regeneración natural en la superficie del manto

4.5.4.2. Análisis de las pérdidas de suelo ingresando los factores de cobertura (C) y prácticas de conservación (P), de acuerdo con los tratamientos implementados en la rehabilitación de la zona de estudio. Después de aplicar los tratamientos para la rehabilitación de las zonas degradadas en la ladera y determinar los más efectivos, se procedió a calcular las pérdidas de suelo, utilizando la ecuación 1, teniendo en cuenta el factor de cobertura (C) de

acuerdo a la vegetación que se desarrolló en las unidades experimentales y las prácticas de conservación (P) implementadas.

4.6.Fase 5. Evaluación del peso ecológico de las especies de la regeneración natural.

4.6.1. Análisis de la cobertura vegetal con la ayuda del software *Image J*.

La presencia y dominancia de las especies de la regeneración natural, en las UE, se obtuvo con la ayuda del análisis de imágenes mediante el software *Image J*. Para lo cual se realizó una calibración de los elementos digitales, utilizando datos reales tomados en campo relacionados con el largo y ancho de la unidad experimental. Luego se procedió a procesar las fotografías mediante la herramienta *Straight*. Seguido se trazó una línea en uno de los lados de la UE en la imagen, la cual es tomada por el programa *Image J* como referencia para hacer una escala pixel sobre la unidad de medida. El paso siguiente fue activar el menú *Analyze/Set Scale*, y en “*Known Distance*” se digitalizó la longitud de la UE; en *Unit of Length direccionando* la unidad de medida a cm. Luego se ingresó a la opción *Global*, y se generó una escala, que obedeció al cociente entre la distancia en pixeles y la distancia conocida. De esta manera se determinaron las medidas aproximadas de las áreas de ocupación del material vegetal en la UE (Figura 30). Este procedimiento se repitió cada 15 días durante tres meses en las 108 UE que no presentaron incorporación de gramínea. A partir de la última medición se obtuvieron los datos con los que se procesó la información para obtener el peso ecológico de las especies.

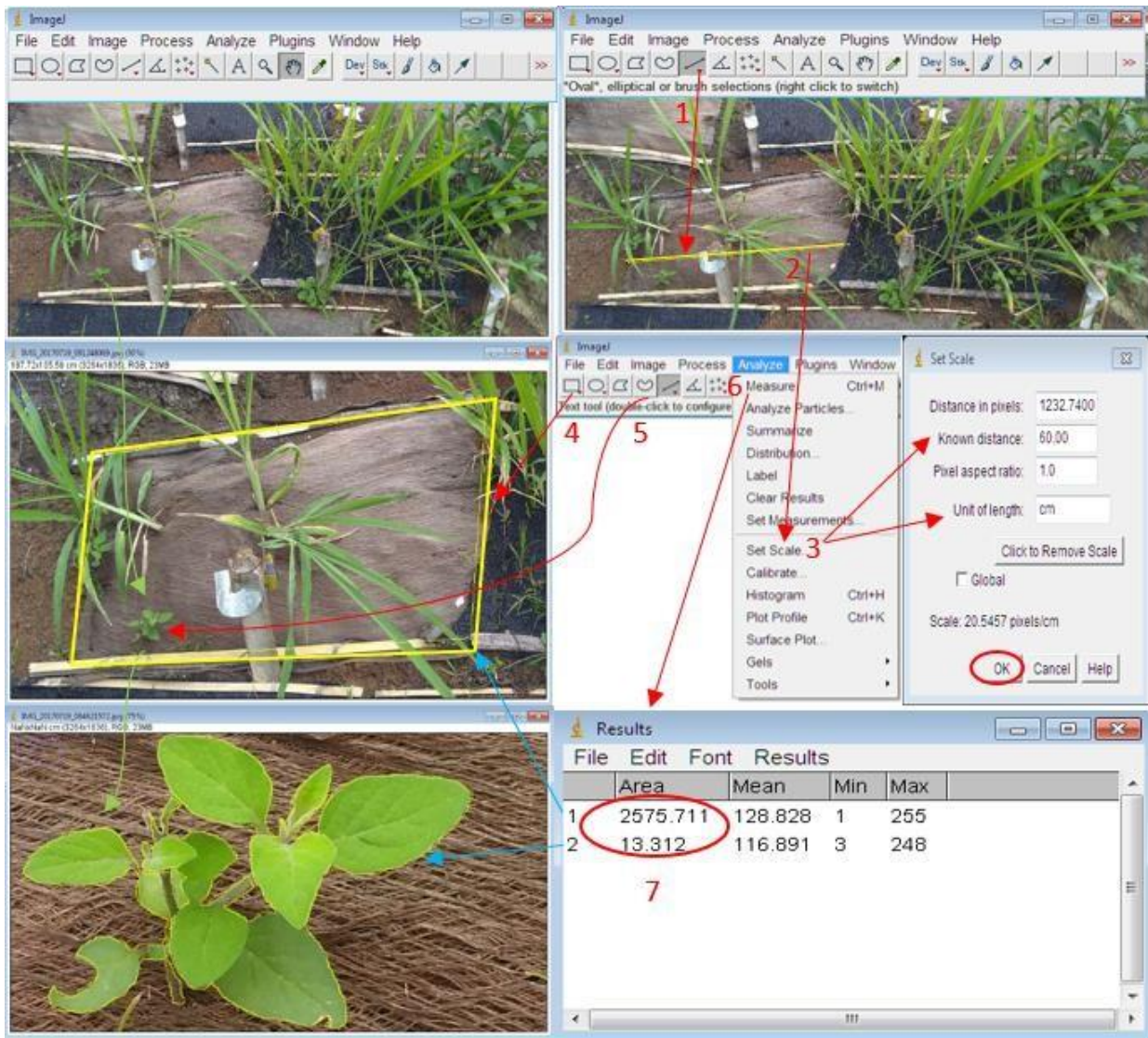


Figura 30. Proceso para el cálculo del área de la cobertura de especies en las unidades experimentales (Rodríguez, 2017).

4.6.2. Índice de valor de importancia (IVI), de la regeneración natural (RN).

Para la evaluación del IVI de la RN se adoptó y ajustó la metodología de estructura horizontal que comúnmente se aplica a la flora forestal en estado fustal, utilizando los índices de ocurrencia de las especies (Melo y Vargas 2003), y que se definen como abundancia, dominancia y frecuencia. Para la investigación fue relevante debido a que permitió ver la importancia ecológica dentro del ecosistema a recuperar de la RN (Rodríguez, 2017). Para determinar el índice de cada

especie, se registraron fotografías quincenales en cada UE para obtener los atributos de los individuos por medio del software *Image J*. A continuación, se muestra la forma en que se calcularon los índices con su respectiva adaptación a las condiciones de regeneración natural:

4.6.2.1. Abundancia. Se realizó el conteo de las plantas registradas en la RN de cada una de las UE.

Abundancia absoluta (Aa): se obtuvo contando el número total de individuos por especie en cada una de las UE (Bajo imagen en *Image J*).

Abundancia relativa: se obtiene a partir de la relación porcentual de cada especie frente al número de plantas, empleando la ecuación 55.

Ecuación 55.
$$Ar = \frac{Ni}{Na} \times 100$$

Donde:

Aa= Ni

Donde:

Aa: Abundancia absoluta

Ar: Abundancia relativa

Ni: Número de individuos por especie

Na: Número de individuos en el área muestreada

4.6.2.2. Dominancia. Se obtuvo a partir del grado de cobertura de las especies como expresión del área ocupada por los individuos en una vista de planta obtenido del programa *Image J* y registrados en hojas de cálculo Excel. La dominancia absoluta se calculó para cada especie a partir de la sumatoria de las áreas de cobertura superficial de la misma especie, presentes dentro de una UE expresada en cm². La dominancia relativa se obtuvo de la relación entre el área de ocupación de una especie sobre el área del manto y la sumatoria total de las

dominancias absolutas de todas las especies registradas en el inventario en porcentaje y se calcula mediante la ecuación 56.

$$\text{Ecuación 56.} \quad Dr = \frac{A_i}{A_t} * 100$$

Donde:

Da= A_i

Donde:

Da: Dominancia absoluta

Dr: Dominancia relativa

A_i : área de ocupación vegetal en el manto en centímetros cuadrados para la i ésima especie.

A_t : Área de ocupación vegetal total en el manto, de la especie para todo el muestreo.

4.6.2.3. Frecuencia. La frecuencia absoluta se obtuvo de la relación porcentual correspondiente al número de unidades de muestreo (UM) en que ocurre una especie entre el número total de las UM, empleando la ecuación 57.

$$\text{Ecuación 57.} \quad Fa = \frac{Nu}{Nt} * 100$$

Dónde:

Fa: Frecuencia absoluta; Nu: Número de UM en que ocurre la especie; Nt: Número total de UE

La frecuencia relativa: se obtuvo de la relación porcentual de la frecuencia absoluta de una especie entre la sumatoria total de las frecuencias absolutas de todas las especies registradas para ello se empleó la ecuación 58.

$$\text{Ecuación 58.} \quad Fr = \frac{Fa}{\sum F} * 100$$

Donde:

Fr: frecuencia relativa

Fa: frecuencia absoluta de la *i*-ésima especie

$\sum F$: Total de frecuencias de las UE

4.6.2.4. Peso ecológico de las especies de la regeneración natural. Se determinó mediante el cálculo del índice de valor de importancia (IVI) para cada especie, el cual se obtuvo de la sumatoria de la abundancia relativa, la frecuencia relativa y la dominancia relativa, de acuerdo a la ecuación 61.

Ecuación 59.
$$IVI = Ar \% + Fr \% + Dr \%$$

Donde:

IVI = Índice de Valor de Importancia

Fr % = Frecuencia relativa

Ar % = Abundancia relativa

Dr % = Dominancia relativa

5. Resultados

5.1. Arquitectura de raíz artificial de mayor estabilidad estructural

En este capítulo se aborda el primer objetivo específico, por lo que se presentan los resultados de los modelos artificiales de arquitectura de raíz, puestos a prueba, en muestras de suelo del área degradada con clases texturales: Arcilloso, franco arenoso y franco.

5.1.1. Arquitecturas de raíz artificial y mucílago en muestras de suelo arcilloso.

A continuación, se muestra en la tabla 8, el análisis de varianza para los tratamientos de arquitectura de raíz y mucílago de *Aloe vera*, incorporados en laboratorio en las muestras de suelo de la clase textural arcillosa del área de estudio. El modelo fue significativo con un p-valor de 0,0001, lo que indica que existen diferencias altamente significativas entre los tratamientos, los cálculos estadísticos complementarios se pueden observar en el anexo 1.

Tabla 8. ANOVA para la producción de sedimentos en muestras de suelo arcilloso con los factores arquitectura de raíz y mucílago

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	20027,78	5	4005,56	360,5	< 0.0001	significant
A-Arquitectura de raíz	11862,11	2	5931,06	533,79	< 0.0001	
B-Mucílago de Aloe	5338,89	1	5338,89	480,5	< 0.0001	
AB	2826,78	2	1413,39	127,21	< 0.0001	
Pure Error	133,33	12	11,11			
Cor Total	20161,11	17				

En la figura 31, se aprecia que en las muestras testigo (T6), a las que no se les incorporo ningún tipo de raíz artificial, tuvieron un desprendimiento de partículas de suelo del 46 %, porcentaje que fue similar a cuando se aplicó mucílago de *Aloe vera* sin arquitectura de raíz (T5), estos tratamientos presentaron altas diferencias significativas frente a los tratamientos T2 (arquitectura de raíz triangular sin mucílago) con pérdidas de 8,3 % y T4 (arquitectura parabólica sin

mucílago) con pérdidas mínimas de 3,8 %; los cuales fueron los más estables en el experimento. Al implementar los dos tipos de arquitecturas de raíz con el mucilago (T1 y T3), el desprendimiento de partículas fue superior al 30 %. Se destaca que los dos tipos de arquitecturas de raíz probadas en el suelo arcilloso brindan un amarre efectivo a las muestras de suelo, limitando el desprendimiento de sedimentos, donde la raíz de arquitectura parabólica fue la que menores desprendimientos de partículas presentó. El efecto del mucílago no fue acertado en este experimento ya que creó limitantes, al no desarrollarse un amarre efectivo en las muestras de suelo, facilitando el desprendimiento de partículas, aun cuando estas presentaban algún tipo de raíz artificial. Así mismo cuando el mucílago entraba en contacto con la fibra, creaba una película que obstaculizaba la cohesión de las partículas del suelo con la fibra.

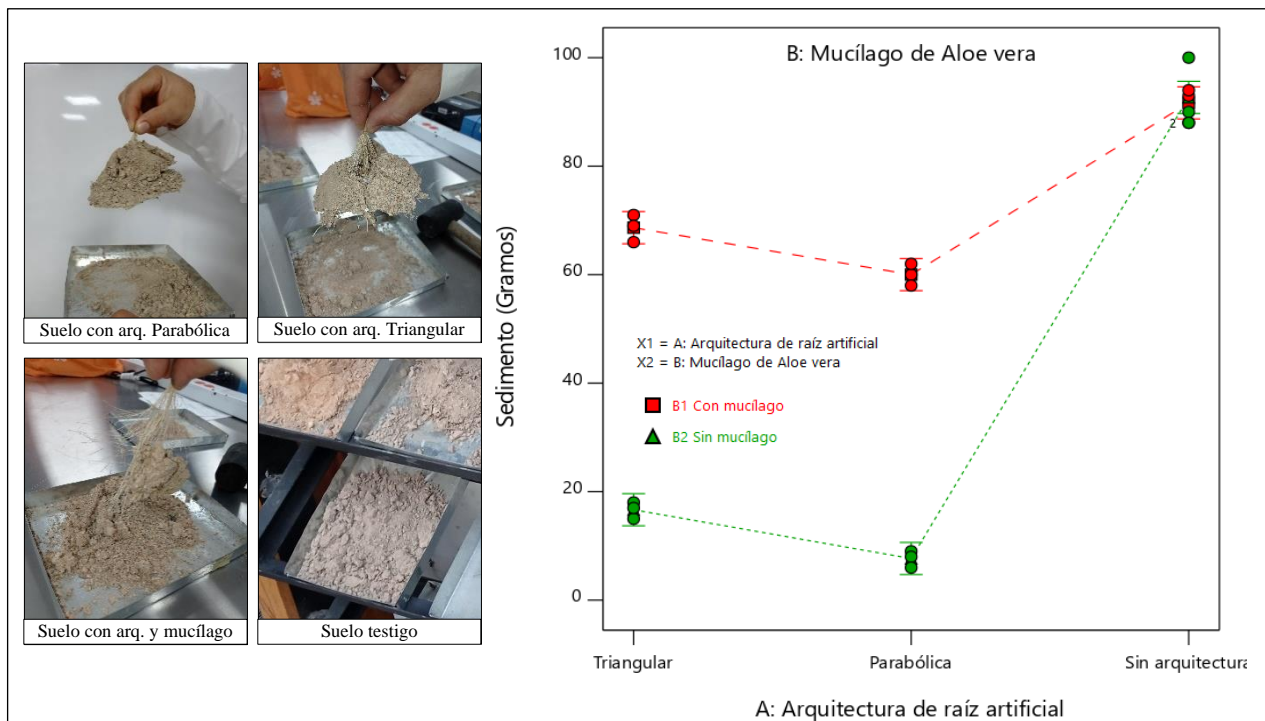


Figura 31. Producción de sedimentos en muestras de suelo arcilloso usando arquitecturas de raíz artificial (triangular y parabólica) y mucílago.

5.1.2. Arquitecturas de raíz artificial y mucílago en muestras de suelo franco arenoso.

En la tabla 9. Se presenta el análisis de varianza para los tratamientos de arquitectura de raíz

artificial y mucílago de *Aloe vera* incorporados en laboratorio en muestras de suelo franco arenosa. Se obtuvo que el modelo fue significativo con un p- valor de 0,0001, lo que indica que existen diferencias altamente significativas entre los tratamientos. Los cálculos estadísticos complementarios se muestran en el anexo 2.

Tabla 9. ANOVA para la producción de sedimentos en muestras de suelo Franco arenoso con los factores arquitectura de raíz y mucílago

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	21851,17	5	4370,23	248,15	< 0.0001	Significant
A-Arquitectura	12709,33	2	6354,67	360,83	< 0.0001	
B-Mucílago de Aloe	4020,06	1	4020,06	228,27	< 0.0001	
AB	5121,78	2	2560,89	145,41	< 0.0001	
Pure Error	211,33	12	17,61			
Cor Total	22062,5	17				

En la clase textural de suelo franco arenoso la mayor estabilidad se obtuvo con la arquitectura de raíz parabólica sin mucílago (T4) con un desprendimiento de partículas del 6,15 % seguido de la raíz triangular sin mucílago (T2) con el 13,8 %. Estas presentaron diferencias altamente significativas frente a los tratamientos a los que se les aplicó mucílago en combinación con las raíces artificiales (T1) y (T3), con pérdidas de sedimento del 31 % y 42,5 %, respectivamente. Por otro lado, las muestras testigo(T6) presentaron el mayor desprendimiento con el 55 % presentando diferencias altamente significativas frente a los T4 y T2. Las muestras a las que solo se les aplicó mucílago (T5), tuvieron pérdidas significativas del 46 %, por lo cual, al incorporar mucílago en las muestras de suelo franco arenoso, no se contribuyó al amarre del suelo, ni en combinación con la arquitectura de raíz artificial como se puede ver en la figura 32.

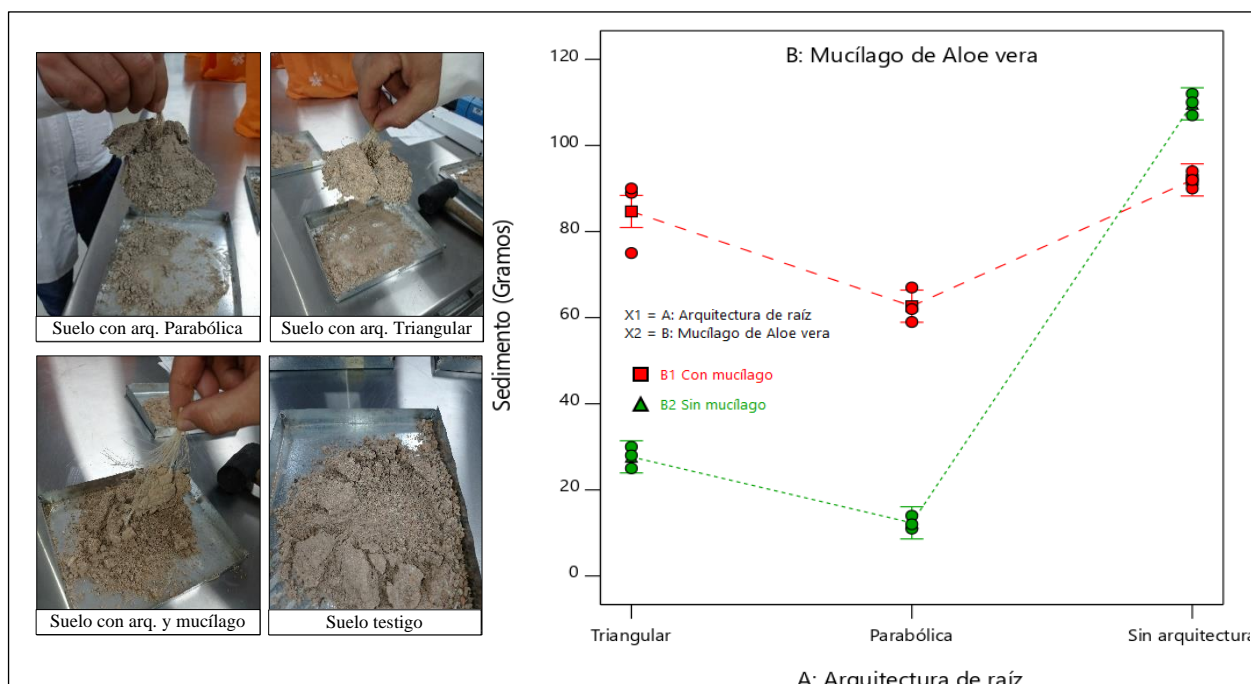


Figura 32. Producción de sedimentos en muestras de suelo franco arenoso usando arquitecturas de raíz artificial y mucílago.

5.1.3. Arquitecturas de raíz artificial y mucílago en muestras de suelo franco

La tabla 10, muestra el análisis de varianza para las muestras de suelo de textura franco, con los tratamientos de arquitectura de raíz y mucílago. El modelo fue significativo con un p-valor de 0,0001, lo que indica que existen diferencias altamente significativas entre los tratamientos.

Los cálculos estadísticos complementarios se pueden observar en el anexo 3.

Tabla 10. ANOVA para la producción de sedimentos en muestras de suelo Franco con los factores arquitectura de raíz y mucílago

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-value	p-value	
Model	21184,94	5	4236,99	242,11	< 0.0001	significant
A-Arquitectura	12124,11	2	6062,06	346,4	< 0.0001	
B-Mucílago de Aloe	5653,39	1	5653,39	323,05	< 0.0001	
AB	3407,44	2	1703,72	97,36	< 0.0001	
Pure Error	210	12	17,5			
Cor Total	21394,94	17				

Todas las muestras que contenían mucílago (T1, T3 y T5) presentaron desprendimientos de partículas del 35 %, mientras que las que solo tenían arquitecturas de raíz, generaron la mayor

estabilidad en el suelo franco, con un desprendimiento de partículas del 9 % para T2, y de 5,3 %, para T4, y presentaron diferencias altamente significativas frente a los demás tratamientos. a las muestras que no se les incorporo la raíz artificial ni el mucílago (T6), generaron las pérdidas más altas de partículas con un porcentaje promedio de 49,15 % como se muestra en la figura 33

Con este experimento preliminar se demostró que, en las tres clases texturales del suelo, la arquitectura de raíz parabólica fue la que generó las mejores condiciones de estabilidad en las muestras de suelo, seguido de la arquitectura de raíz artificial triangular. Mientras que las muestras que contenían solo el mucílago de *Aloe vera* no limitaban las pérdidas de sedimento. En cuanto al tratamiento testigo presentó las mayores pérdidas de suelo en todas las muestras de suelo con diferente clase de textura. Teniendo en cuenta lo anterior la raíz artificial que se eligió para ser implementada en las zonas de ladera objeto de estudio fue la Parabólica.

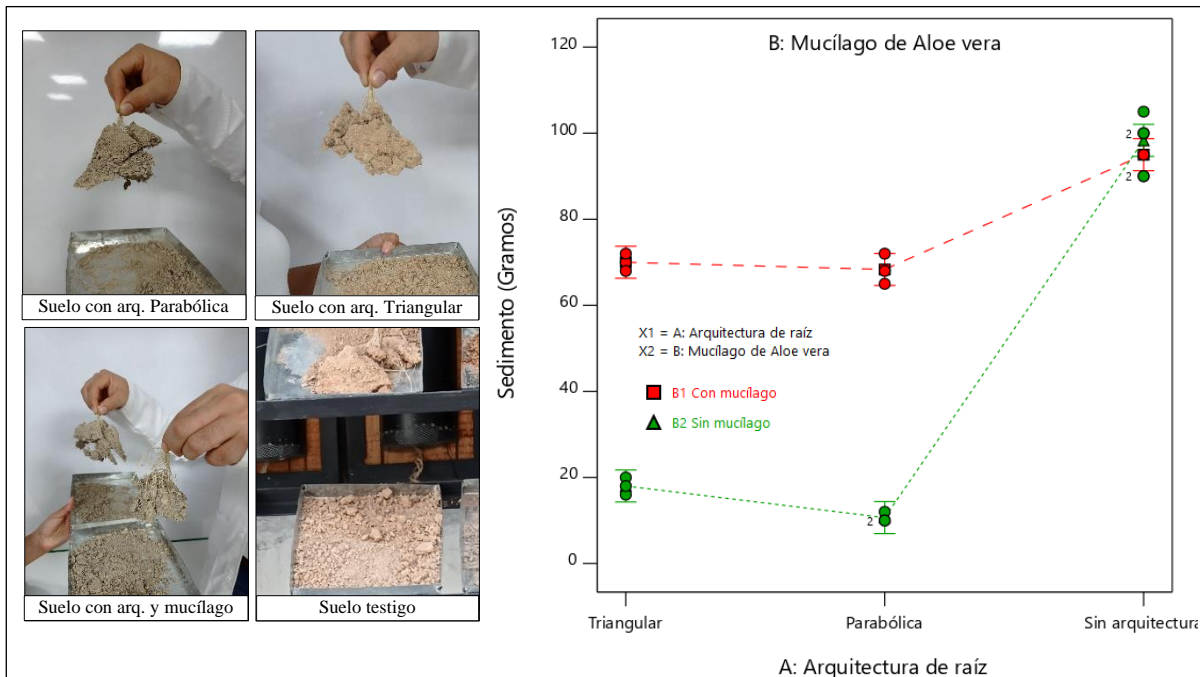


Figura 33. Produccion de sedimentos en muestras de suelo franco usando arquitecturas de raíz artificial y mucílago.

5.2. Diagnóstico hidrofísico, biomecánico y ambiental del área degradada.

En este capítulo se aborda el objetivo específico 2, por lo cual se muestran los resultados del diagnóstico de la composición florística, causas y efectos de la degradación, impactos ambientales., análisis estadístico de las variables del suelo, pérdidas por erosión estimadas e índice de productividad estimado en las diferentes zonas de la ladera objeto de estudio.

5.2.1. Composición florística.

En el área evaluada (20 m a la redonda de la zona objeto de estudio) se encontró una flora arbórea muy limitada con 8 especies en 13 árboles fustales. En cuanto a la diversidad herbácea se encontraron 7 especies con predominio de introducidas como se puede ver en la tabla 11, y cobertura general compuesta por gramíneas.

Tabla 11. Flora arbórea y herbácea circundante a 20 metros de la zona oibjeto de estudio.

Nombre vulgar	Flora Arbórea		Flora herbácea	
	Nombre científico	Número de Individuos	Nombre vulgar	Nombre científico
Teca	<i>Tectona grandis</i>	1	Pacunga	<i>Bidens pilosa</i>
Igua	<i>Albizia guachapele</i>	3	Saboya	<i>Panicum maximum</i>
Cachingo	<i>Erythrina poeppigiana</i>	1	Estrella	<i>Cynodon nlemfuensis</i>
Yarumo	<i>Cecropia peltata</i>	2	Helecho marrano	<i>Pteridium aquilinum</i>
Limón swingle	<i>Swinglea glutinosa</i>	2	Corocillo	<i>Cyperus iria</i>
Guanábano	<i>Annona muricata</i>	2	Coquito	<i>Cyperus rotundus</i>
Nacedero	<i>Trichanthera gigantea</i>	1	Cadillo	<i>Cenchrus brownii</i>
Cope	<i>Ficus pallida</i>	1		

5.2.2. Impactos ambientales en la zona objeto de estudio.

5.2.2.1. Causa y efecto. Se determinaron 5 grandes causas detonadoras de la degradación de la ladera, derivadas del uso inadecuado del suelo, como lo fue el establecimiento de potreros, flora introducida, implementación de ganadería en montaña, construcción de vía nacional y deterioro de las tuberías transportadoras de agua que, al quedar expuestas en la superficie, fueron fisuradas por el pisoteo del ganado, presentando fugas de agua. Los efectos más significativos obedecieron a remoción en masa, erosión, desplazamiento de flora y fauna, pérdida de

coberturas, deterioro de la fertilidad del suelo y un impacto paisajístico negativo, como se puede ver en la Tabla 12.

Tabla 12. Matriz causa y efecto en el área objeto de estudio

Causa \ Efecto	Remoción en masa	Erosión hídrica	Desplazamiento de flora	Desplazamiento de fauna	Pérdida de coberturas	Deterioro de la fertilidad del suelo	Impacto paisajístico negativo
Ganadería en montaña	X	X		X		X	X
Construcción de vía nacional	X	X	X	X	X	X	X
Deterioro de tubería transportadora de agua	X	X				X	X
Flora introducida			X		X		
Establecimiento de potreros en montaña		X	X		X	X	

5.2.2.2. Matriz de importancia (impacto ambiental). Teniendo en cuenta la matriz de causa y efecto se elaboró la matriz de importancia de impactos ambientales negativos, en la cual se identificaron 4 grandes actividades de diferentes sectores productivos que fueron identificadas como las causantes de la degradación de la ladera, las cuales correspondieron al establecimiento de potreros, ganadería en montaña, construcción de vía terrestre, conducción de agua y siembra de especies exóticas. De estas se derivaron 8 aspectos que hicieron referencia al cambio de uso del suelo, compactación, erosión, emisiones atmosféricas, remoción del suelo, corte de la ladera, fugas de agua y especies introducidas; provocando principalmente 8 grandes impactos ambientales negativos, identificados cualitativamente, relacionados con el deterioro de los recursos naturales, pérdida de cobertura, afectación a la fauna, contaminación visual, pérdida de suelo, contaminación atmosférica, pérdida de biodiversidad de flora y deterioro de suelo. De acuerdo con la calificación de cada uno en la matriz de importancia (Tabla 13) se identificaron impactos severos (alto), moderados (medio) e irrelevantes (bajo); por lo cual las medidas de

manejo se propusieron de forma integrada de tal manera que abordara en su totalidad los impactos y aspectos de una determinada actividad, teniendo en cuenta que, al subsanar los impactos negativos de mayor jerarquía, se genera un efecto de mitigación a los de menor nivel. En las actividades que generaron solo impactos moderados como fue la conducción de agua y la siembra de especies exóticas se generaron medidas de manejo puntuales, ya que estas eran causantes directos del incremento del valor de los impactos ambientales negativos ocasionados por otras actividades; ya que, de no subsanar las fugas de agua, las medidas que se implementaron en la rehabilitación de la ladera serian ineficientes.

Tabla 13. Matriz de importancia (impactos ambientales en la zona objeto de estudio).

Actividad	Aspecto ambiental	Impacto ambiental	Naturaleza	Extensión	Persistencia	Sinergia	Efecto	Recuperabilidad	Intensidad	Momento	Reversibilidad	Acumulación	Periodicidad	Importancia	Clasificación	Medida de manejo
Establecimiento de potreros	cambios de uso del suelo	Deterioro de los recursos naturales	Negativo	8	4	4	4	4	8	8	2	4	4	74	Alto -	Establecer sistemas productivos acorde al uso del suelo, e implementar arreglos agroforestales y obras culturales para la contención del suelo y recuperación de coberturas.
Ganadería	Compactación	Deterioro del suelo	Negativo	8	4	2	1	2	8	2	2	4	4	61	Alto -	
		Perdida de cobertura	Negativo	2	2	4	4	4	8	4	4	4	2	56	Alto -	
	Erosión hídrica	Afectación a la fauna	Negativo	1	2	2	1	4	2	2	2	4	2	27	Medio -	
		Contaminación visual	Negativo	4	4	1	1	4	4	8	2	4	4	48	Medio -	
		Perdida de suelo	Negativo	4	2	4	1	4	2	2	2	4	4	37	Medio -	
Emisiones atmosféricas	Contaminación atmosférica	Negativo	1	2	1	1	2	1	2	2	4	4	23	Bajo -		
Construcción de vía nacional	Remoción de suelo	Perdida de suelo	Negativo	5	2	4	4	8	2	8	4	4	4	54	Alto -	-Establecer medidas de compensación, mediante la estabilización de la ladera en pendientes mayores a los 50°.
		Afectación a la flora y fauna	Negativo	1	4	4	1	4	4	2	2	1	4	36	Medio -	
		Deterioro de suelo	Negativo	5	4	4	4	8	4	8	4	4	1	59	Alto -	
		contaminación visual	Negativo	5	4	1	1	4	8	8	2	4	4	62	Alto -	
	Corte de la ladera	Deterioro de los recursos naturales	Negativo	4	2	4	1	4	4	2	1	4	4	42	Medio -	-Promover el desarrollo de la regeneración natural -Aplicación de enmiendas orgánicas, _Reforestación puntual con especies nativas en la parte alta y baja de la ladera (pendientes menores a los 50°)
Conducción de agua	Fugas de agua	Deterioro del suelo	Negativo	1	4	4	4	2	1	2	2	4	4	31	Medio -	Protección de línea transportadora de agua y cambio de tubería.
siembra de especies exóticas	Especies introducidas	Pérdida de biodiversidad de flora	Negativo	1	2	4	4	4	1	2	4	4	4	33	Medio -	Establecer flora Arbórea nativa y minimizar la introducida dominante.
		Afectación a la fauna	Negativo	1	1	4	1	2	2	2	2	4	4	28	Medio -	

5.2.3. Pendientes generales de cada una de las zonas de ladera objeto de estudio.

A cada una de las zonas objeto de estudio se le determino las pendientes, siendo así que la que presentó menor inclinación al no estar afectada por el proceso de movimiento en masa fue la de cultivo, seguido de la zona baja y alta, mientras que las zonas más afectadas fueron las de la parte media con la mayor inclinación (Tabla 14) y mayor degradación

Tabla 14. Pendientes generales en porcentaje y grados de las zonas objeto de estudio.

Zona de ladera	Distancia X (cm)	Distancia Y (cm)	Longitud Hipotenusa (cm)	Pendiente %	Pendiente °
Cultivo	5564	925	5640,4	16,6	9,44
Alta	1548	517	1632,1	33,4	18,47
Media 1	456	603	756	132,2	52,90
Media 2	456	460	756	100,9	45,25
Media 3	456	400	756	87,7	41,26
Baja	2504	745	2612,5	29,8	16,57

5.2.4. Profundidad efectiva promedio en cada una de las zonas objeto de estudio.

Se realizaron 4 calicatas por cada zona para obtener la profundidad efectiva promedio, encontrando capas con limitaciones físicas para el desarrollo de raíces derivadas del material parental, tipo cascajo. La zona de mayor profundidad fue la de cultivo con 60 cm, seguido de la parte baja con 40 cm y la parte alta con 30 cm, las zonas de la parte media 1, 2 y 3, fueron las de menor profundidad efectiva con un valor de 10 cm, como se puede ver en la tabla 15.

Tabla 15. Profundidad efectiva en cada una de las zonas de ladera.

Zona de Ladera	Profundidad (cm)	Limitante
Cultivo	60	Material parental- arcilla
Alta	30	Material parental- arcilla
Media 1	10	Material parental- arcilla
Media 2	10	Material parental- arcilla
Media 3	10	Material parental- arcilla
Baja	40	Material parental.

5.2.5. Descripción de los parámetros del suelo en cada una de las zonas de la ladera objeto de estudio.

Se encontró una alta variabilidad espacial en los suelos del área de estudio. A continuación, en la tabla 16, se presenta un análisis comparativo de cada una de las variables del suelo en las diferentes zonas de ladera.

Tabla 16. Características del suelo en 4 muestras de diferentes zonas de la ladera objeto de estudio.

Zona de ladera	pH	Conductividad dS/m	DR gr/cm ³	DA gr/cm ³	CIC $\frac{Cmol}{Kg}$	MO %	DMP mm	Índice de plasticidad	Arcilla %	Limo %	Arena %
Cultivo 1.	5,34	0,059	2,404	1,218	8,588	1,868	0,257	12,476	21	44	35
Cultivo 2.	4,75	0,090	2,198	1,220	12,152	1,568	0,702	6,212	13	43	44
Cultivo 3.	4,78	0,019	2,289	1,144	20,073	2,706	0,257	10,516	21	33	45
Cultivo 4.	5,30	0,109	2,126	1,000	7,172	4,039	0,441	7,623	8	24	67
Alta 1.	5,26	0,019	2,332	1,041	14,502	1,296	0,602	8,159	29	29	42
Alta 2.	4,88	0,034	2,422	1,208	15,712	1,913	0,469	9,538	32	33	35
Alta 3.	5,05	0,030	2,185	1,148	13,917	1,072	0,594	7,524	21	27	52
Alta 4.	4,53	0,023	2,160	1,232	10,500	3,365	0,868	7,997	15	30	55
Media 1.1	4,98	0,010	2,171	1,482	10,134	0,100	0,295	12,871	53	27	20
Media 1.2	4,77	0,010	2,268	1,504	9,664	0,740	0,162	8,408	56	27	17
Media 1.3	4,83	0,011	2,122	1,510	18,010	0,608	0,155	10,539	50	18	32
Media 1.4	5,34	0,038	2,197	1,439	11,565	1,267	0,290	11,271	48	26	26
Media 2.1	4,59	0,080	2,433	1,426	9,534	0,913	0,263	5,030	34	32	34
Media 2.2	4,87	0,012	2,448	1,398	8,775	0,829	0,155	8,316	26	29	45
Media 2.3	4,38	0,046	2,312	1,460	5,963	3,091	0,311	10,568	26	31	43
Media 2.4	4,95	0,047	2,248	1,592	10,657	2,561	0,190	9,136	30	29	41
Media 3.1	4,86	0,018	2,305	1,466	12,526	0,732	0,256	8,684	28	33	39
Media 3.2	5,10	0,072	2,139	1,529	8,670	1,866	0,195	4,240	26	36	38
Media 3.3	4,82	0,015	2,091	1,512	9,986	0,869	0,152	4,935	26	15	59
Media 3.4	4,68	0,072	2,172	1,333	11,214	0,871	0,149	6,861	28	40	32
Baja .1	5,24	0,014	2,204	1,603	13,219	0,100	0,299	6,749	26	19	55
Baja .2	4,47	0,109	2,338	1,243	2,379	0,634	0,151	6,204	15	35	50
Baja. 3	5,06	0,024	2,503	1,262	12,084	0,896	0,170	11,086	44	33	23
Baja. 4	4,69	0,024	2,124	1,370	9,952	1,574	0,288	9,715	45	34	21

5.2.5.1. pH. De acuerdo con el ANOVA para pH, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las zonas objeto de estudio. La clasificación fue moderadamente ácida a fuertemente ácido. Este parámetro presentó una amplia variabilidad en

las muestras de una misma zona como se puede apreciar en la gráfica A de la figura 34. En términos generales el pH promedio del cultivo fue de 5,05, mientras que, en las zonas degradadas, tendió a ser más ácido, sobre todo en la zona 2, con un pH promedio de 4,7.

5.2.5.2. Conductividad eléctrica (dS/m). No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la conductividad eléctrica de las zonas objeto de estudio, (ver el ANOVA del anexo 5). Los valores de conductividad fueron bajos, por lo cual no se evidencia problemas de salinidad, el mayor valor promedio se generó de la zona de cultivo (0,07), lo cual es normal al no haber presentado desprendimientos de suelo y conservar de forma natural los nutrientes y la fertilización de los cultivos. Los menores valores de conductividad se aprecian en la zona alta (0,026) y media 1 (0,017) como se puede ver en la gráfica B de la figura 34.

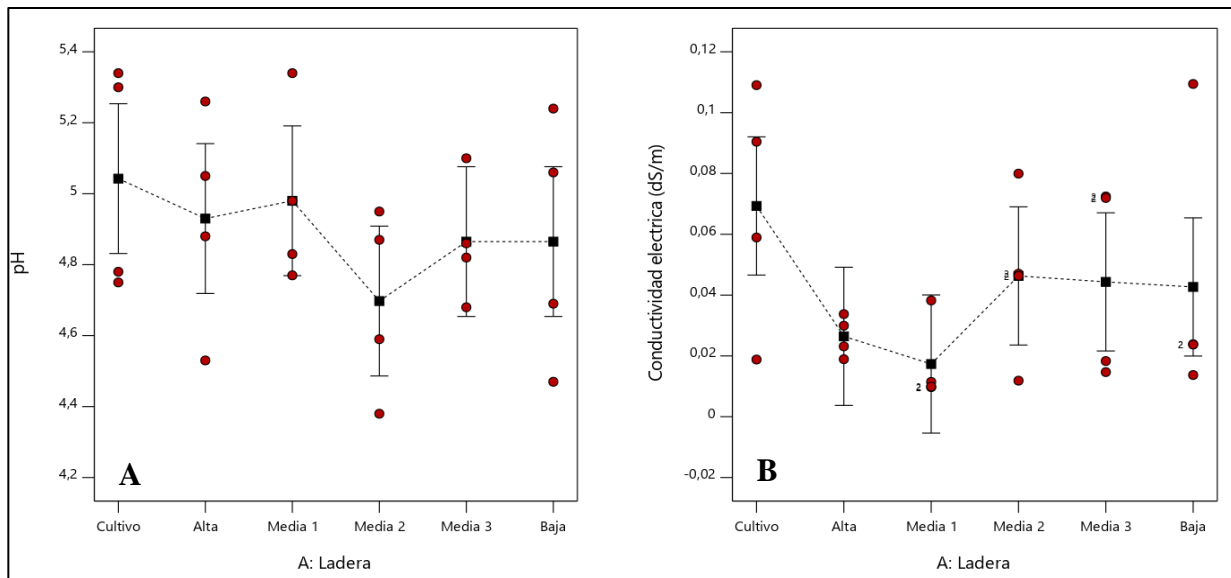


Figura 34. Valores del pH (A) y conductividad eléctrica (B) en los suelos de las zonas de ladera objeto de estudio

5.2.5.3. Densidad real, DR (g/cm³). No se encontraron diferencias estadísticamente significativas de la densidad real en las zonas de ladera (ver ANOVA, Anexo 6). La mayor DR que se registró fue de 2,5 y la mínima de 2,1. En la gráfica A de la figura 35, se puede observar

que los valores son variables entre las muestras de suelo de una misma zona.

5.2.5.4. Densidad aparente, DA (g/cm^3). Se encontraron diferencias estadísticamente significativas de la densidad aparente en las zonas de ladera (ver ANOVA, anexo 7). Las mayores diferencias se encontraron en la zona de cultivo con una DA promedio de 1,14, frente a las zonas media 1, (1,48); media 2 (1,46); media 3 (1,45) y baja (1,37). La zona alta de la ladera (1,15) no distó del cultivo, siendo estas las que presentaron las mejores condiciones de DA en la ladera como se muestra en la gráfica B, de la figura 35. De acuerdo con la textura de cada una de las zonas, se puede indicar que los valores de densidad aparente en la parte media de la ladera alcanzan valores que se consideran limitantes para el desarrollo de raíces (Pla, 1983; Delgado y López, 1998; Lozano *et al.*, 2000)

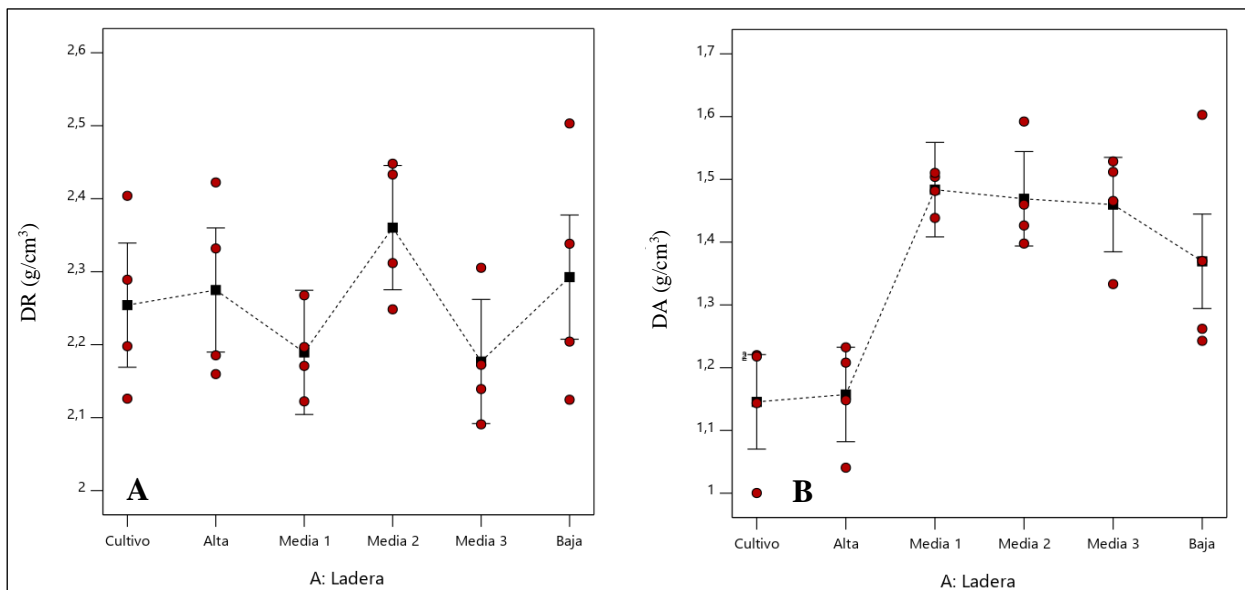


Figura 35. Valores de la DR (A) y la DA (B) en los suelos de las zonas de ladera objeto de estudio

5.2.5.5. Capacidad de intercambio catiónico, CIC (cmol/kg de suelo). No se encontraron diferencias estadísticamente significativas de la CIC en las zonas de ladera (ver ANOVA del anexo 8). Lo que indica que la degradación por remoción en masa no presentó un efecto significativo en los cambios de variable de este parámetro. Los valores de CIC en las

ladera (ANOVA, anexo 10). Donde el mayor DMP de los agregados lo presento la zona alta (0,63) seguido de cultivo (0,41), las cuales presentaron diferencias significativas frente a las zonas: media 1, media 2, media 3 y baja con un valor promedio de 0,22 como se muestra en la gráfica A de la figura 37. Esta diferencia indica una pérdida de la estabilidad estructural, que se manifiesta en la distribución de los agregados estables al agua, revelando que la degradación del suelo por remoción generó una disminución de la estabilidad estructural en la parte media y baja de la ladera.

5.2.5.8. Índice de plasticidad IP (%). No se encontraron diferencias estadísticamente significativas del índice de plasticidad en las zonas de ladera, de acuerdo con el análisis de varianza (Anexo 11). El mayor IP promedio lo obtuvo la zona media 1 con (10,7) mientras que el menor fue el de la zona media 3 con (6,2), como se puede ver en la gráfica B de la figura 37. En la medida que los valores del IP sean mayores de 10, los suelos serán más susceptibles a problemas de degradación por compactación (Pla, 1983; Lozano *et al.*, 2000).

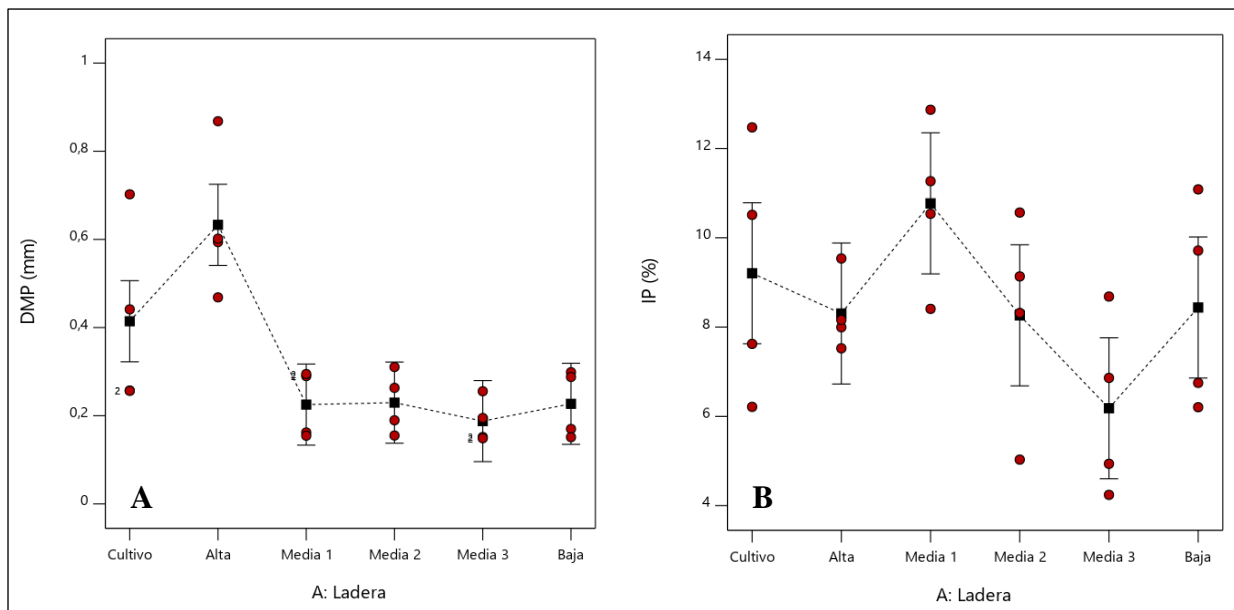


Figura 37. Valores del DMP (A) y el IP (B) en los suelos de las zonas objeto de estudio

5.2.5.9. Contenido de arcilla %. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los contenidos de arcilla en las zonas de ladera (ver ANOVA, anexo 12). En la gráfica A de la figura 38, se puede ver que la zona media 1, fue la que presentó mayor contenido de arcilla (51,75 %) con altas diferencias significativas frente a la zona de cultivo (15,75). Así mismo en la parte alta (24,25), media 2 (29), media 3 (27) y baja con (32,5). Esta sería una evidencia de que, al perderse las capas superficiales por la degradación debido a la erosión hídrica, lo que aflora es la capa arcillosa.

Contenido de limo %. No se encontraron diferencias estadísticamente en los contenidos de limo en las zonas de ladera (ver ANOVA, anexo 13). Sin embargo, se puede apreciar que la zona que conserva el mayor contenido de limo es la zona de cultivo como se muestra en la gráfica B de la figura 38, lo que indica que parte del limo se perdió de las capas superficiales por el fenómeno de remoción y erosión hídrica.

Cabe destacar que las partículas de limo, junto con las de arena muy fina y fina (partículas con diámetro equivalente entre 2 y 250 μm son las requieren menor energía para separarse de los agregados del suelo (Poesen, 1986) por lo que les confieren a los suelos baja estabilidad estructural y mayor susceptibilidad al sellado, encostrado y compactación

5.2.5.10. Contenido de arena %. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas en los contenidos de arena (ver ANOVA, anexo 14). La menor cantidad de arena la presentó la zona media 1. Como se muestra en la gráfica C de la figura 38.

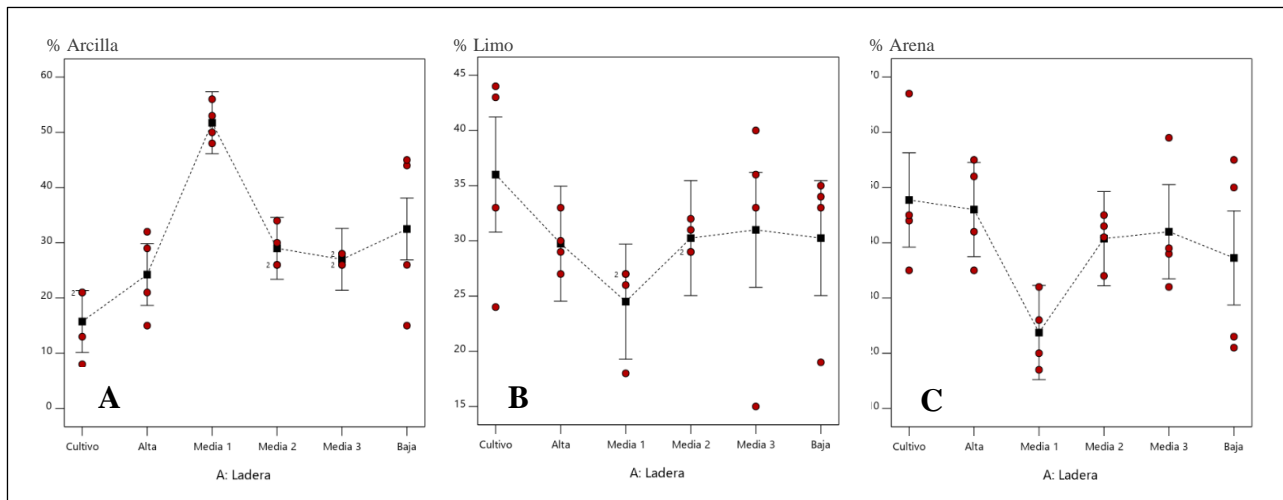


Figura 38. Contenidos de la arcilla(A), limo (B) y arena (C) en los suelos de las zonas objeto de estudio

5.2.5.11. Distribución del tamaño de partículas. En la tabla 17, se muestran las proporciones de las partículas de arcilla, limo y arenas en cada una de las zonas de la ladera. Se determinaron las fracciones de arena como insumo base para hallar las pérdidas de suelo mediante la ecuación de *RUSLE* (próximo apartado). Así mismo se hallaron las clases texturales de suelo por muestras de suelo y las predominantes por zona.

Con respecto a la presencia de partículas de mayor separabilidad, que de acuerdo a los criterios de Poesen (1986) le confieren al suelo una menor estabilidad estructural, se encontró una proporción en la zona de cultivo, lo cual le hace más susceptible a los problemas de degradación física. La proporción de este tipo de partículas es diferente en los suelos de la zona bajo estudio, incluso entre suelos pertenecientes a una misma clase textural.

Tabla 17. Distribucion de tamaño de partículas en las zonas de ladera objeto de estudio.

Zonas de ladera	Muestra	Arcilla < 2mm	Limo 2 - 50mm	Arena muy fina 50 - 100	Arena fina 100 - 250	Arena media 250 - 500	Arena gruesa 500 - 1000	Arena muy gruesa 1000 - 2000	Total, arenas	Clase textural	Clase textural predominante por zona
Cultivo	1	21	44	15	12	3	3	2	35	F	F F-Arc-A
	2	13	43	24	15	3	1	1	44	F	
	3	21	33	21	19	4	1	1	45	F	
	4	8	24	38	25	2	2	1	67	F-Arc-A	
Alta	1	29	29	8	6	6	10	12	42	F-Arc	F-Arc F-Arc-A
	2	32	33	11	8	2	4	10	35	F-Arc	
	3	21	27	12	8	10	12	10	52	F-Arc-A	
	4	15	30	11	12	4	8	20	55	F-Arc-A	
Media 1	1	53	27	6	4	2	2	6	20	Arc	Arc
	2	56	27	7	4	2	2	2	17	Arc	
	3	50	18	7	7	2	9	7	32	Arc	
	4	48	26	4	4	6	8	4	26	Arc	
Media 2	1	34	32	9	9	4	4	8	34	F-Arc	F-Ar F-Arc-A
	2	26	29	15	13	3	4	10	45	F-Arc-A	
	3	26	31	23	10	3	4	3	43	F-Arc-A	
	4	30	29	17	12	2	3	7	41	F-Arc	
Media 3	1	28	33	15	8	2	7	7	39	F-Arc	F F-Arc F-A
	2	26	36	6	20	2	4	6	38	F	
	3	26	15	9	9	11	15	15	59	F-A	
	4	28	40	12	8	3	5	4	32	F-Arc	
Baja	1	26	19	11	12	9	11	12	55	F-Arc-A	F-Arc-A Arc
	2	15	35	28	4	2	8	8	50	F-Arc-A	
	3	44	33	9	8	3	2	1	23	Arc	
	4	45	34	1	2	6	6	6	21	Arc	

Nota: Arc=(arcilla); F=(franco); F-Arc-A=(franco arcillo arenoso); F-Arc= (franco arcilloso); F-A=(franco arenoso).

5.2.6. Análisis de los datos hidrometeorológicos.

En la tabla 18, se presentan los resultados de la precipitación media mensual con lo cual se halló que la precipitación media anual es de 1590,13 mm en el período evaluado (años 2000 al 2021), con un valor mínimo de 1009,60 en el año 2015, y un máximo de 2425,10 en el año 2011. Los índices de Fournier modificado alcanzaron valores promedio de IFM1= 153,32 y IFM2 = 177,94. El IFM1, el cual representa el promedio del período, es clasificado como alto, mientras que el IFM2, que incluye las variaciones interanuales es clasificado como muy alto. Esto denota que la precipitación en la zona es de alta a muy alta agresividad; mientras que el índice de concentración de la precipitación ICP1= 9,64 señala que la distribución de la precipitación es uniforme, el ICP2 = 11,22 moderadamente estacional (Michiels y Gabriels, 1996). Por su parte el índice de erosividad EI₃₀ de 6226,92 es clasificado como moderado (Rivera y Gómez, 1991).

Tabla 18. Precipitación media mensual, precipitación media anual, MFI 1, MFI2, PCI1, PCI2, EI30

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	TOTAL	IFM2	ICP 2
2000	294,8	187,7	251,7	149,3	302,9	172,8	57,6	50,63	82,4	172,4	122,1	167,6	2011,93	206,16	10,247
2001	165,1	158,4	240,6	189,4	149,2	76,2	45,3	21,3	40,7	114,7	223,3	217,6	1641,80	175,85	10,711
2002	18,9	78,7	92,5	171,1	138,1	80	63,4	76,3	56,2	100,8	82,7	105,2	1063,90	104,26	9,800
2003	83,2	138,1	117,2	129,9	65,1	79,97	32,3	12,8	72	179,1	119,3	83,9	1112,87	114,10	10,253
2004	193,9	113	144,6	193,8	102,3	63,1	89,3	17,6	58,1	100,3	231,4	324,2	1631,60	186,11	11,406
2005	104,6	148,6	232,1	123,6	79,8	42,9	31,7	69,8	65,8	145,6	126,6	145,5	1316,60	135,94	10,325
2006	216,7	157	214,8	212,2	42,2	144,3	97,3	26,3	65,9	141,3	196	171,4	1685,40	170,67	10,126
2007	62,8	114,8	170,3	139	145,2	84,7	69,7	43,4	20,7	241,49	200,32	219,8	1512,21	163,75	10,829
2008	255,44	121,9	111,4	166,5	180,4	80,2	76,7	43,5	48,4	143,7	160,2	221	1609,34	164,35	10,212
2009	292,5	162,2	126,8	134	111,2	48,1	52,9	52,7	62	131,4	104,5	93,2	1371,50	150,84	10,998
2010	108,8	99,1	27,1	138,7	221	77,5	151	37	47,5	149,1	332,5	171,7	1561,00	182,69	11,703
2011	177,4	251,4	202,6	264	189,6	193,1	109,1	10	71,2	296,7	301,7	358,3	2425,10	248,71	10,256
2012	301,4	178	200,8	176,3	45,9	29,2	23,5	37,5	25,5	99,2	100,86	233,28	1451,44	188,73	13,003
2013	13,3	189,7	110,7	116,25	256,3	37,8	67,6	68,2	40,8	93,3	167,2	159,1	1320,25	152,93	11,584
2014	139,7	297,8	364,7	102,1	127,7	117,2	40	64,6	44,9	150,65	82,1	221,3	1752,75	209,88	11,975
2015	151,5	64,1	254,8	59,3	59,2	103,3	30	26,9	40,6	22,7	168,2	29	1009,60	141,24	13,990
2016	21,1	63,3	123,7	256,3	138,3	124	72,8	44,1	56	210,9	325,4	244,3	1680,20	202,58	12,057
2017	221,6	144,7	427,6	221,7	224,1	88,3	36,3	58,5	29,3	106,1	271,9	106,3	1936,40	238,66	12,325
2018	168,8	84,4	76,67	183	121	142,6	51,67	25,2	76,4	215,4	420,67	91,1	1656,91	211,69	12,777
2019	92,17	191,54	245,5	206,5	193,23	74,90	42	43,62	26,2	210,18	212,2	216,56	1754,60	188,93	10,768
2020	191,4	143,3	187,4	78,9	159,8	76,3	177,9	61,1	57,5	51,2	167	188,38	1540,14	152,29	9,888
2021	64,9	257,3	198,3	168,1	183,3	152,2	32,6	68,6	29,4	203,3	399,8	179,46	1937,26	224,43	11,585
Mean	151,82	152,05	187,36	162,73	147,08	94,94	65,94	43,62	50,80	149,07	205,27	179,46	1590,13	177,94	11,219
IFM 1	14,50	14,54	22,08	16,65	13,60	5,67	2,73	1,20	1,62	13,97	26,50	20,25	153,32		
ICP 1	0,91156	0,91431	1,38827	1,04724	0,85559	0,35647	0,17196	0,07525	0,10204	0,87884	1,66644	1,27375	9,64		
EI 30	584,91	586,59	875,99	667,75	550,73	245,97	133,30	74,25	90,61	564,93	1045,84	806,06	6226,92		

5.2.6.1. Índices de Fournier modificado e índice de la concentración de la

precipitación. El índice de Fournier modificado se clasificó como muy alto, para el 70 % de los años con valores elevados (> 160) como se puede ver en la gráfica A de la figura 39; mientras que el índice de la concentración de la precipitación se mantuvo en el rango de moderadamente estacional durante el período 2000 -2021, casi en la totalidad de los años, como se muestra en la gráfica B de la figura 39.

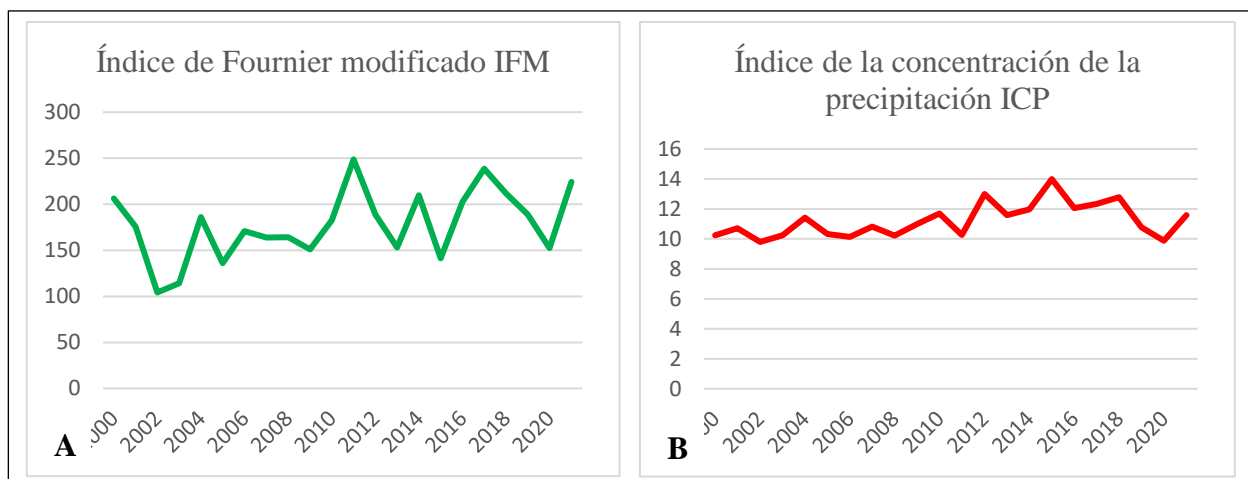


Figura 39. Distribución interanual del IFM anual (A) y del ICP anual (B)

5.2.7. Estimación de las pérdidas de suelo usando la ecuación RUSLE

La valoración de los factores de la *RUSLE*, para cada una de las zonas de ladera, se presentan a continuación. Con ellos se estimaron las pérdidas de suelo por erosión y el valor máximo que podrían alcanzar los factores de cobertura y prácticas de conservación para mantener las pérdidas de suelo en los límites tolerables.

5.2.7.1. Erosividad de la lluvia, R (MJ.mm.ha-1.h-1). La energía erosiva de la lluvia para las 6 zonas de ladera correspondió a 6226,92. MJ.mm.ha⁻¹.h⁻¹, calculada a partir del EI₃₀, tomando en consideración los criterios propuestos por Rivera y Gómez (1991) para las condiciones de Colombia.

5.2.7.2. Erosionabilidad del suelo en las zonas de ladera (K). En este factor se analizaron parámetros como la clase de estructura descrita en campo, la cual para la zona de cultivo se clasificó como fina, mientras que, para las zonas con procesos de degradación, varió a gruesa. La permeabilidad, estimada por los valores alcanzados por la tasa de infiltración básica, resultó moderada para la zona baja, mientras que para el resto fue de moderada a rápida. El mayor contenido de materia orgánica se halló en la zona de cultivo con un valor de 2,55 % y en las demás fue variable debido al grado de degradación que presentaba cada una. El valor de M se determinó a partir del contenido de arcilla, limo, y arena muy fina como se muestra en la tabla 19. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en la erosionabilidad de cada una de las zonas (ver ANOVA anexo 15). Donde la zona que presentó mayor erosionabilidad fue la de cultivo, debido en gran medida a que presentó los mayores contenidos de limo y arena muy fina como se muestra en la gráfica A de la figura 40.

Tabla 19. Subfactores que determinan erosionabilidad.

Zonas	C.E	C.P	MO	Arcilla < 2 um	Limo 2 – 50 um	Arena muy fina 50 – 100	M	K
Media 1	4	1	0,65	51,75	24,5	6	1.471,6	0,0015
Media 2	3	1	1,85	29	30,25	16	3.283,8	0,0026
Media 3	3	2	1,09	27	31	10,5	3.029,5	0,0029
Alta	4	2	1,91	24,25	29,75	10,5	3.048,9	0,0031
Baja	4	3	0,78	32,5	30,25	12,25	2.868,8	0,0036
Cultivo	2	2	2,55	15,75	36	24,5	5.097,1	0,0041

Nota: K: erosionabilidad; MO: materia orgánica; C.E: código estructura = 2 Fina; 3 Grueso granular, 4 blocosa; C.P: código permeabilidad = 1 Rápido; 2 Moderada rápido; 3 Moderada

5.2.7.3. Factor topográfico (LS). Para este factor se encontraron diferencias estadísticamente significativas (ver ANOVA anexo 16). En la gráfica A, de la figura 40, se observan los valores del factor LS, en la ladera, donde las zonas de cultivo, alta, y baja, presentaron los valores más bajos, lo cual es consistente al tener las menores pendientes, mientras que la zona media 1, muestra el mayor valor de LS, y se relaciona con las zonas media

2 y media 3, como las de mayor impacto ambiental, por poseer las mayores pendientes.

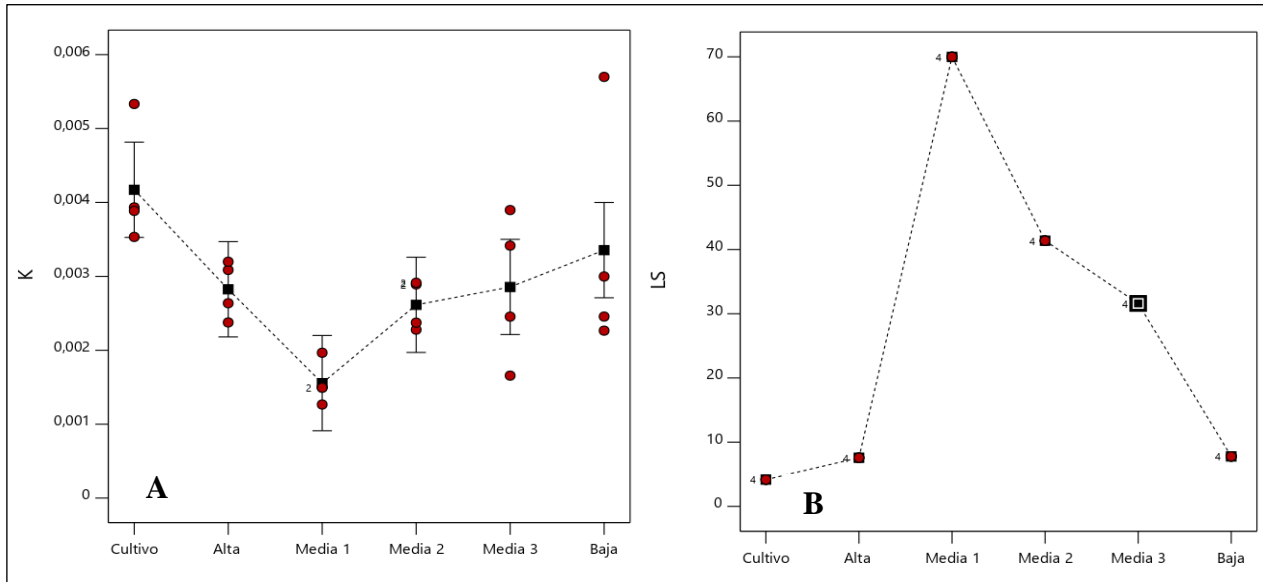


Figura 40. Factor de erosionabilidad del suelo (A) y factor topográfico LS (B) en las zonas de ladera objeto de estudio

5.2.7.4. Estimación de las pérdidas máximas de suelo, A ($Mg\ ha^{-1}\ año^{-1}$). Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,0001$) en cuanto a la estimación de las pérdidas máximas de suelo de las diferentes zonas de ladera (ver ANOVA en anexo 17), es decir, las pérdidas de suelo sin tomar en consideración los factores de cobertura (C) y prácticas de conservación (P). La zona de cultivo fue la que presentó el menor valor promedio con $8,5\ Mg\ ha^{-1}\ año^{-1}$, seguido de la zona alta y la baja. Mientras que la zona media 1, registro la estimación de mayores pérdidas de suelo, seguido de la media 2, y la media 3 como se muestra en la gráfica A de la figura 41.

Cabe destacar que, a pesar de que el área de estudio está sometida a la misma agresividad climática o erosividad, las pérdidas de suelo resultaron diferentes, ya que la erosionabilidad de los suelos en cada una de zonas de la ladera es diferente. De igual manera el factor topografía determinado por la longitud y el gradiente de la pendiente es diferente en cada zona.

5.2.7.5. Valor máximo que podrían alcanzar los factores cobertura (C) y las prácticas de conservación (P) para mantener las pérdidas de suelo en los límites tolerables ($CP_{m\acute{a}x}$). Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,0001$) en el $CP_{m\acute{a}x}$, de las zonas objeto de estudio (ver ANOVA en anexo 18). En donde la zona de cultivo presentó las menores exigencias del factor C y P con diferencias altamente significativas frente a las 5 zonas degradadas; mientras que las zonas medias 1, media 2 y media 3, presentaron la mayor necesidad de factores de alta efectividad en cobertura y prácticas de conservación como se muestra en la gráfica B de la figura 41. De acuerdo con los criterios de Páez (1994), en la medida que los valores de $CP_{m\acute{a}x}$ sean más bajos significa que los requerimientos de cobertura y prácticas de conservación son mayores.

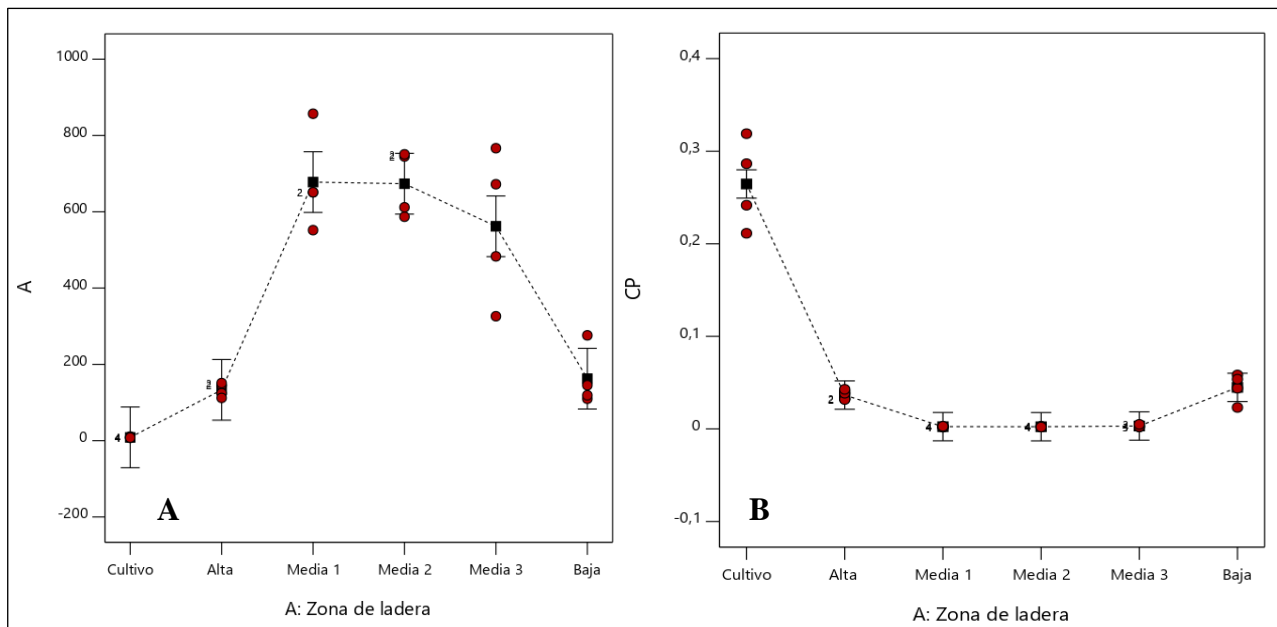


Figura 41. Pérdidas máximas de suelo (A), y Valores del $CP_{m\acute{a}x}$, en cada una de las zonas de ladera objeto de estudio (B).

5.2.8. Índice de productividad (IP)

A continuación, se describen los resultados estadísticos de los su subfactores utilizados para obtener el índice de productividad de las zonas de ladera objeto de estudio, el cual es un reflejo

de los efectos de la erosión hídrica sobre la capacidad productiva de los suelos.

5.2.8.1. Condiciones que regulan las relaciones agua- aire en los suelos (Subfactor A2). Se encontraron diferencias altamente significativas ($p < 0,0001$) en el subfactor A2 (ver ANOVA en anexo 19) que representa las condiciones que regulan las relaciones agua – aire en los suelos de las diferentes zonas de ladera, las cuales se vieron significativamente afectadas por los procesos de erosión hídrica (ver gráfica A, de la Figura 42). Este comportamiento que estaría asociado a los cambios en el tipo de estructura y contenidos de arcillas que fueron considerados en la evaluación de esta cualidad. La zona de cultivo presentó diferencias significativas frente a las zonas con procesos de degradación, donde la que tuvo mayor afectación fue la zona media 1.

5.2.8.2. Condiciones que determinan la resistencia mecánica para la exploración de las raíces del cultivo (subfactor B1). Para el subfactor (B1) se encontraron diferencias estadísticamente significativas (ver ANOVA en el anexo 20). Las zonas de cultivo, alta y baja obtuvieron un valor de (1), las cuales presentaron altas diferencias frente la zona media 1 (0,45), la media 2 (0,87) y la media 3 (0,89) (ver gráfica B, de la Figura 42). A pesar de que estas últimas zonas se encuentran ubicadas de forma contigua en el centro de la ladera, presentan variabilidad en el subfactor B1, lo que evidencia la influencia de los cambios en la densidad aparente y textura del suelo en las impedancias mecánicas para el desarrollo de las raíces de las coberturas vegetales.

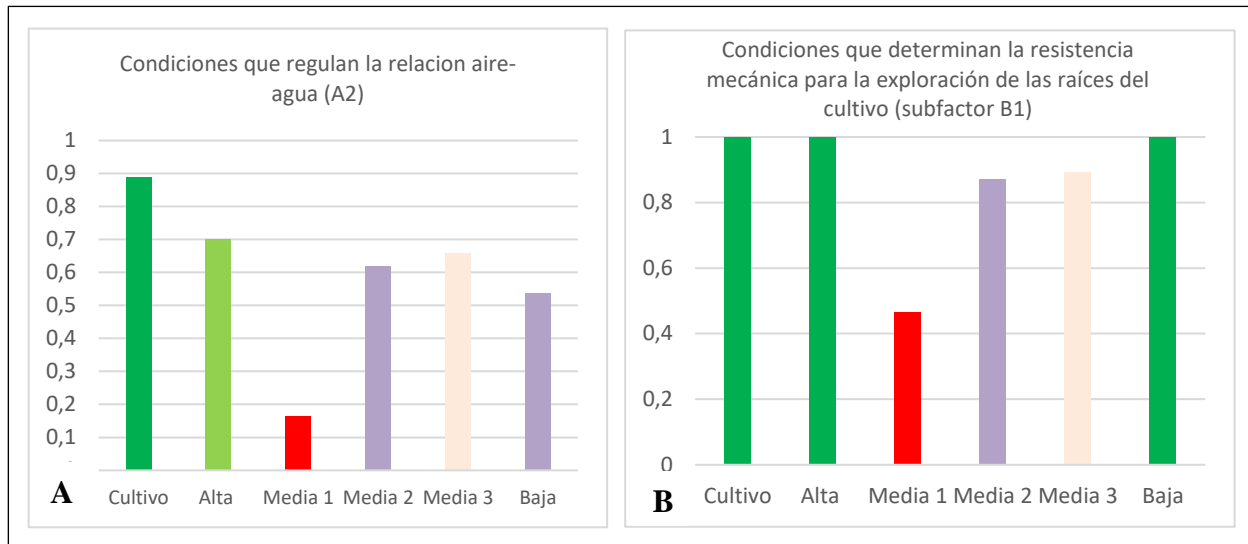


Figura 42. Efectos de la erosión sobre el subfactor A2 (A) y subfactor B1 (B). en las zonas de estudio.

5.2.8.3. Condiciones que regulan la fertilidad potencial del suelo (C1). No se encontraron diferencias significativas en los valores de C1, para las 6 zonas de ladera, ya que los suelos de las diferentes zonas de la ladera presentan valores de pH pertenecientes al mismo rango de calificación (moderado a fuertemente ácido).

5.2.8.4. Importancia Relativa Del Horizonte Del Suelo (K). Se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0.0001$) en el factor k de las zonas de la ladera (ver ANOVA en el anexo 21). La zona de cultivo con un valor de 0,67; presentó altas diferencias significativas frente a las 5 zonas con procesos de degradación, debido a que esta no fue expuesta a los movimientos en masa y conservó su profundidad natural. seguido de la parte baja (0,49), la cual, a pesar de ser impactada, fue la que más ganancia de sedimento tuvo, al situarse en el pie de la ladera, mientras que la parte alta presentó un K de 0,39. El valor más bajo lo recibió las zonas medias 1, 2 y 3 con 0,16 (ver gráfica A, Figura 43). Lo que evidencia la afectación del proceso erosivo sobre la profundidad efectiva de los suelos en las zonas de mayor pendiente.

5.2.8.5. Índice de productividad para los suelos de la ladera (IP). El ANOVA para el

análisis de IP muestra que existen diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,0001$) (ver anexo 22) en la productividad de los suelos de las diferentes zonas de la ladera. La zona de cultivo presentó los mayores valores de IP, con un valor promedio altamente significativo (0,56) frente a las demás zonas de ladera que presentaban procesos de degradación del suelo. Las diferencias significativas también se presentaron al contrastar las zonas de mayor pendiente: media 1 (0,01), media 2 (0,07) y media 3 (0,08) frente a las zonas alta (0,25) y baja (0,24), como se puede observar en la gráfica B, de la figura 43. Por lo anterior a manera general el IP indica la mayor productividad para la zona de cultivo; moderada para la zona alta y baja, y una productividad reducida para las zonas de la parte media 1, 2 y 3 de la ladera objeto de estudio.

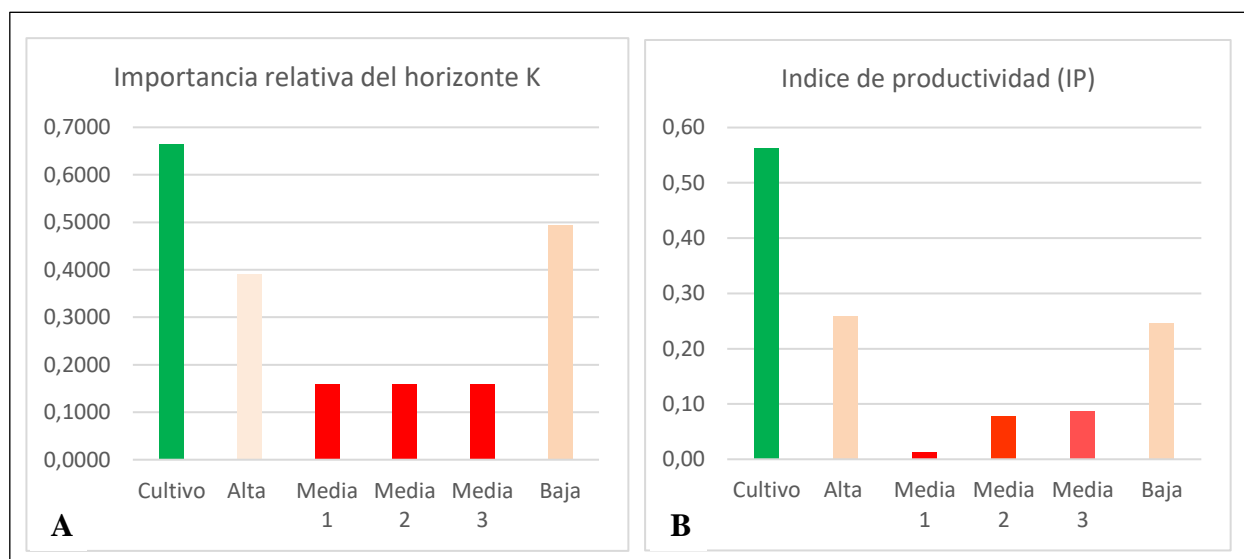


Figura 43. Importancia relativa del horizonte del suelo o subfactor K (A). Índice de productividad en cada una de las zonas de ladera (B).

5.3. Bioinsumos potenciales como tratamientos en la rehabilitación del área degradada

En este capítulo se aborda el tercer objetivo específico, por lo que se presentan los análisis de las enmiendas orgánicas (compost y vermicompost) y la validación de estas, en combinación con tres especies forestales para la rehabilitación de la zona alta y baja de la ladera.

5.3.1. Evaluación de las enmiendas obtenidas a partir de residuos orgánicos.

El compost y el vermicompost contribuyeron con la mitigación de impactos ambientales negativos al transformar residuos contaminantes de mayor generación en el departamento del Huila, en productos aprovechables como enmiendas orgánicas. Los dos sustratos presentaron un pH dentro del rango de neutralidad lo que evidencia una óptima estabilización, la densidad aparente en el compost fue de $0,6 \text{ g/cm}^3$ y la de vermicompost de $0,9 \text{ g/cm}^3$, (Tabla 20), al tener densidades bajas permite mejorar las condiciones físicas del suelo, tal como lo expresa Tortosa (2011). se destaca el aporte de materia orgánica; ya que en el vermicompost fue del 39 % y la del compost fue del 33,6 %, La incorporación de estos materiales sería de gran importancia, teniendo en cuenta que la mayor parte de los suelos de la ladera presentan bajos contenidos de materia orgánica y baja estabilidad estructural, por lo que tales aportes podrían manifestarse en mejoras en la formación y estabilización de la estructura del suelo (Pulido *et al*, 2009). Así mismo este tipo de enmiendas aportan macro y micronutrientes con una conductividad eléctrica muy baja (Tabla 20). Por otro lado, la incorporación de materiales orgánicos al suelo favorece las propiedades biológicas, y estimulan el crecimiento de las plantas en un sistema equilibrado (Julca-Otiniano, *et al.*, 2006).

Tabla 20. Analisis de las enmiendas obtenidas apartir de residuos de estiercol bovino y pulpa de cafe

Elemento	Vermicompost	Compost
pH	6,95	6,8
Humedad (%)	31	40,4
Densidad Aparente (g/cm^3)	0,9	0,6
Conductividad Eléctrica (dS/m)	0,011	0,24
Nitrógeno Total (%)	1,5	1,2
Fósforo (%)	0,8	0,6
Potasio (%)	0,3	0,25
Materia Orgánica (%)	39	33,6
Calcio %	5,4	0,51
Magnesio %	0,9	1,8
Hierro %	1	0,2
Manganeso %	0,005	0,007

Cobre %	0,003	0,001
Zinc %	0,01	0
Boro %	0,003	0

5.3.2. Evaluación de las enmiendas orgánicas en combinación con las especies *Jacaranda caucana pittier*, *Anacardium excelsum* y *Cariniana pyriformis* en la rehabilitación de la zona alta y baja de la ladera.

A continuación, se describe el análisis estadístico del comportamiento en desarrollo de altura y diámetro de cada una de las especies forestales junto con las enmiendas de compost y vermicompost en la zona alta y baja de la ladera

5.3.2.1. Desarrollo de altura (H) y diámetro (Ø) de la especie *Cariniana pyriformis* con la incorporación de enmiendas orgánicas en la zona alta y baja de la ladera. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las enmiendas de compost y vermicompost aplicado sobre el desarrollo de la especie *Cariniana pyriformis* con respecto diámetro del tallo (ver ANOVA en anexo 22) y altura de las plantas (Ver ANOVA en anexo 23). Con el vermicompost la especie obtuvo un diámetro promedio de 29 mm y una altura de 222,5 cm, estadísticamente diferente frente al tratamiento control con un ϕ de 19,75 mm, y una H de 187,7 cm. Por su parte con el compost la especie presentó una diferencia mínima (26,5 mm de diámetro promedio y 212,9 cm de altura), pero que distaron de manera significativa del tratamiento control. La efectividad promedio del compost frente al control, fue de un 32,5 % para ϕ y 13,2 % para H; mientras que el vermicompost fue de 45% y 18% respectivamente (ver Figura 44, gráfica A para ϕ , y gráfica B para H). Es de resaltar que esta especie *Cariniana pyriformis* es ampliamente recomendada en sistemas agroforestales sostenibles (CNCh, 2021). Sin embargo, en esta investigación presentó alta susceptibilidad al ataque de la hormiga arriera, por lo cual, a pesar de su desarrollo con las enmiendas orgánicas, si no se realiza un control

efectivo para la hormiga, no se recomienda implementarla en la rehabilitación de laderas y taludes.

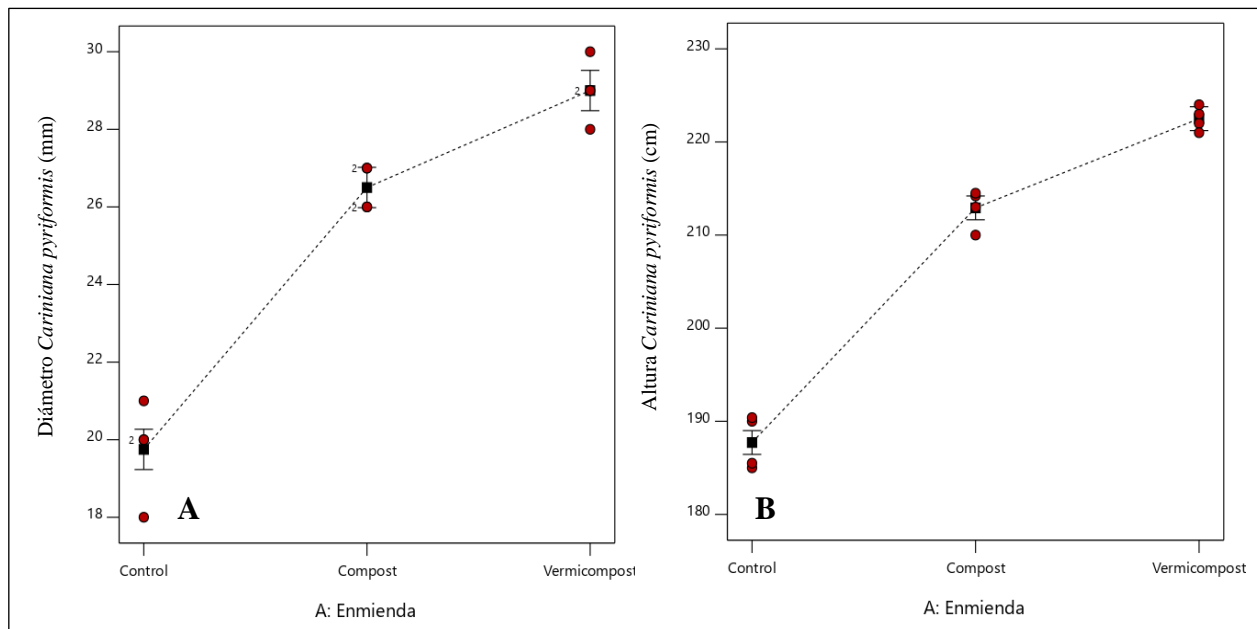


Figura 44. Efecto de las enmiendas en el crecimiento del diámetro y altura de la especie *Cariniana pyriformis* (zona alta y baja de la ladera).

5.3.2.2. Desarrollo de la altura (H) y diámetro (Ø) de la especie *Anacardium*

***excelsum* con la incorporación de enmiendas orgánicas en la zona alta y baja de la ladera.**

Para esta especie *Anacardium excelsum*, se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el desarrollo de crecimiento en altura de las plantas con las enmiendas orgánicas, (ver ANOVA en anexo 24), y para diámetro del tallo (ver ANOVA en anexo 25). Siendo así que las diferencias entre los tratamientos se encontraron al contrastar el tratamiento control (Ø 67,3 cm; H 313,5) con el vermicompost (Ø 91,2 cm; H 433,4). Es de resaltar que el compost (Ø 80,6 cm; H 392), también presentó altas diferencias significativas frente al control, como se muestra en gráfica A de la figura 45, para diámetro y gráfica B para altura. El promedio en crecimiento de la especie *Anacardium excelsum* aplicando compost fue de 20 % para Ø y un 25 % para H, frente al tratamiento control; mientras que el de vermicompost fue de 35,5 % y de

38,2 % respectivamente, siendo este último el de mejor comportamiento. Se destaca que esta especie demostró unas características fisiológicas que facilitan su adaptación y desarrollo en la ladera, y que se potencializó con el uso de las enmiendas, principalmente bajo el uso de vermicompost.

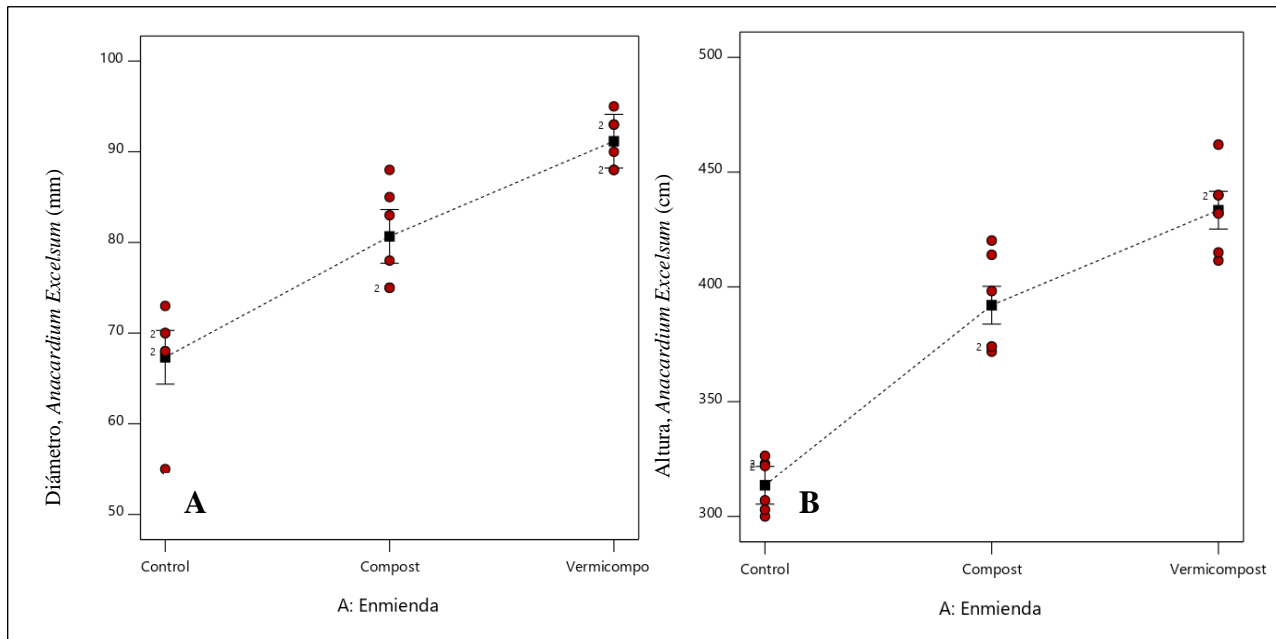


Figura 45. Efecto de las enmiendas en el crecimiento del diámetro y altura de la especie *Anacardium excelsum* (zona alta y baja de la ladera).

Es importante tener en cuenta a esta especie para ser usada en restauración ecológica en sistemas silvopastoriles y agrosilvopastoriles, debido a los servicios ecológicos que presta (Lozano *et al.*, 2007).

5.3.2.3. Desarrollo de la altura y diámetro de la especie *Jacaranda caucana* con la incorporación de enmiendas orgánicas. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el desarrollo de la especie *Jacaranda caucana* con la implementación de compost y vermicompost, como se puede ver en los ANOVA para diámetro (ver anexo 26) y altura (ver anexo 27).

En la figura 46, se pueden ver las diferencias con respecto al crecimiento en diámetro (gráfica A), donde la especie con el tratamiento del vermicompost alcanza un promedio de 44,8 mm el cual dista de manera significativa del tratamiento control con 37 mm, y conserva una diferencia menor con el tratamiento con compost, donde alcanza un promedio de 41,6 mm. De la misma forma en la gráfica B, con respecto al crecimiento en altura, la especie bajo el tratamiento de vermicompost obtiene mayor valor promedio con 285,6 cm, seguido del tratamiento compost con 239,3 cm y por último el control con 201,6 cm, conservando diferencias significativas.

Por lo cual se determinó que la efectividad promedio de las enmiendas frente al tratamiento control es un 12,4 % para ϕ en el tratamiento con compost y un 19,7 % para H, mientras que la efectividad del vermicompost fue de 21,1 % y 42,8 %, respectivamente.

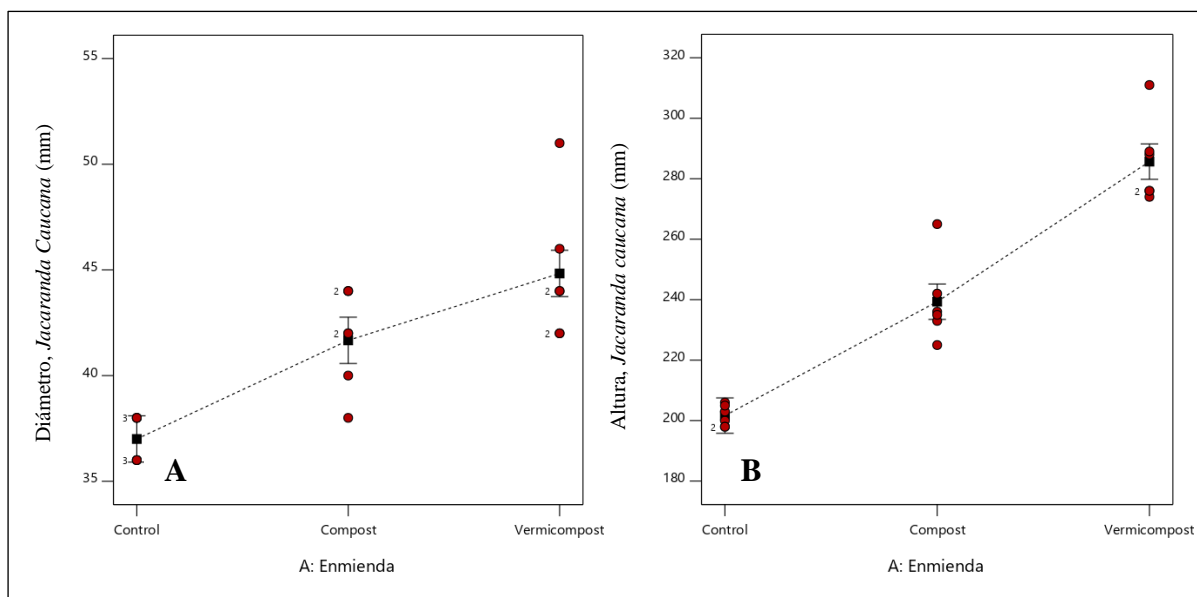


Figura 46. Efecto de las enmiendas en el crecimiento del diámetro y altura de la especie *Jacaranda caucana* (zona alta y baja de la ladera).

Las tres especies forestales a pesar de tener un crecimiento diferente debido a su fisiología presentaron un comportamiento similar en cuanto al desarrollo cuando se implementaron las enmiendas orgánicas en la zona alta y baja de la ladera. Se pudo observar que el vermicompost

incorporado al suelo fue el que generó los mayores beneficios, razón por la cual fue el insumo que se seleccionó como tratamiento complementario para la rehabilitación del área degradada de mayor pendiente (media 1, media 2 y media 3). La especie *Anacardium excelsum* resulta ser excelente para la reforestación de laderas con procesos de degradación, debido a su buena adaptación, rápido crecimiento y resistencia a insectos patógenos.

5.4. Efectividad de los tratamientos raíz artificial, enmienda, manto y gramínea) para la rehabilitación integral del área degradada de mayor pendiente.

En este capítulo se aborda el objetivo específico número cuatro, por lo cual se muestran los resultados del desarrollo de las coberturas en las zonas degradadas de mayor pendiente en tres suelos de diferente clase textural, así como la estimación de las pérdidas de suelo de acuerdo con los tratamientos más efectivos para la rehabilitación de la ladera.

5.4.1. Distribución de las pendientes de las UE en tres zonas de la ladera.

Las pendientes en la zona media 1 (Arcillosa), media 2, (Franco arcillosa) y media 3 (franca), oscilaron entre los 40° y 85°, la ubicación de las UE para las tres clases texturales de suelo tuvo como factor de bloque la inclinación de la ladera, por lo cual los tratamientos se ubicaron en tres rangos de inclinación comprendidos entre 40° - 55°; 56° - 70° y 71° - 85°.

5.4.2. Análisis de la efectividad de los tratamientos en el desarrollo de coberturas verdes en la zona media 1, con suelos de textura arcillosa

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas (ver ANOVA en el anexo 28) entre las siguientes combinaciones de factores (AB, BC, CD, BCD, ABCD) frente al desarrollo de coberturas en la zona media 1, con suelos de textura arcillosa.

Los factores que se analizaron en el presente estudio fueron raíz artificial (A), con dos subfactores: con raíz (A1) y sin raíz (A2). El segundo factor correspondió a gramínea

incorporada de *Hyparrhenia rufa* (B), con dos subfactores: con gramínea (A1) y sin gramínea (A2), como tercer factor se tuvieron en cuenta los mantos no convencionales con tres subfactores correspondientes a: *Manicaria* (C1), polietileno (C2) y sin manto (C3). El cuarto factor correspondió a enmienda (D), con dos subfactores: con vermicompost (D1) y sin vermicompost (D2). A continuación, se describe la efectividad de cada uno de ellos en la zona media 1, con suelo de textura arcillosa.

5.4.2.1. Efecto de los factores manto (C) y enmienda (D) en el desarrollo de cobertura, con interacción de los subfactores: sin gramínea (B2), y con raíz artificial (A1).

Al aplicar el vermicompost (D1) bajo el establecimiento de los dos tipos de manto, el desarrollo de la cobertura vegetal fue óptimo, con valores cercanos al 100 % de ocupación de área en las unidades experimentales. Pero cuando no se implementaron los mantos, el desarrollo de la cobertura promedio fue inferior al 27 %. Por otro lado, cuando se establecieron los mantos, pero no se aplicó enmienda, el desarrollo de la cobertura disminuyó al 21 %. El valor más bajo de cobertura (6 %) se obtuvo cuando no hubo presencia de manto ni de vermicompost. Como se muestra en la gráfica a de la figura 47. La efectividad de los mantos de *Manicaria* y de polietileno presentaron una efectividad similar. Estos resultados pueden ser explicados por los efectos positivos que las coberturas tienen como elementos protectores, que reducen la evaporación del agua en el suelo y por lo tanto aumentarían su disponibilidad (Shaxson y Barber, 2005). No obstante, este efecto se potencializa cuando se aplica una enmienda orgánica, en este caso el vermicompost, que estaría contribuyendo a la disponibilidad de agua en el suelo y que además estaría aportando nutrientes esenciales para las plantas, como se presentó en la tabla 20, tal como lo han destacado las investigaciones de Gómez y Rivera (1993) y Vázquez y Loli (2018).

5.4.2.2. Efecto de los factores manto (C) y enmienda (D) en el desarrollo de cobertura, cuando interactúan los subfactores: con gramínea (B1), y con raíz Artificial (A1). Bajo las condiciones de manto y enmienda, con gramínea, la cobertura no presenta cambios significativos con valores cercanos al 100 %, y se mantiene igual que cuando no se incorporó la gramínea, pero que la presencia de esta última favoreció a las unidades experimentales que no tenían establecidos mantos con un valor promedio de 33 %. Cuando no se aplicó el vermicompost, los valores de cobertura se redujeron al 22 % a pesar de tener la gramínea en las unidades con manto. Se destaca que, aunque los mantos son efectivos para la retención de partículas del suelo (mitigación de la erosión) y soporte de las plantas, son ineficaces si no hay enmienda orgánica para estimular el desarrollo de la cobertura a corto plazo en el suelo arcilloso de la ladera. Así mismo no existe diferencia significativa entre usar el manto de *Manicaria* y el de polietileno, siendo los dos viables para la rehabilitación de la zona media 1. Como se muestra en la gráfica b de la figura 47.

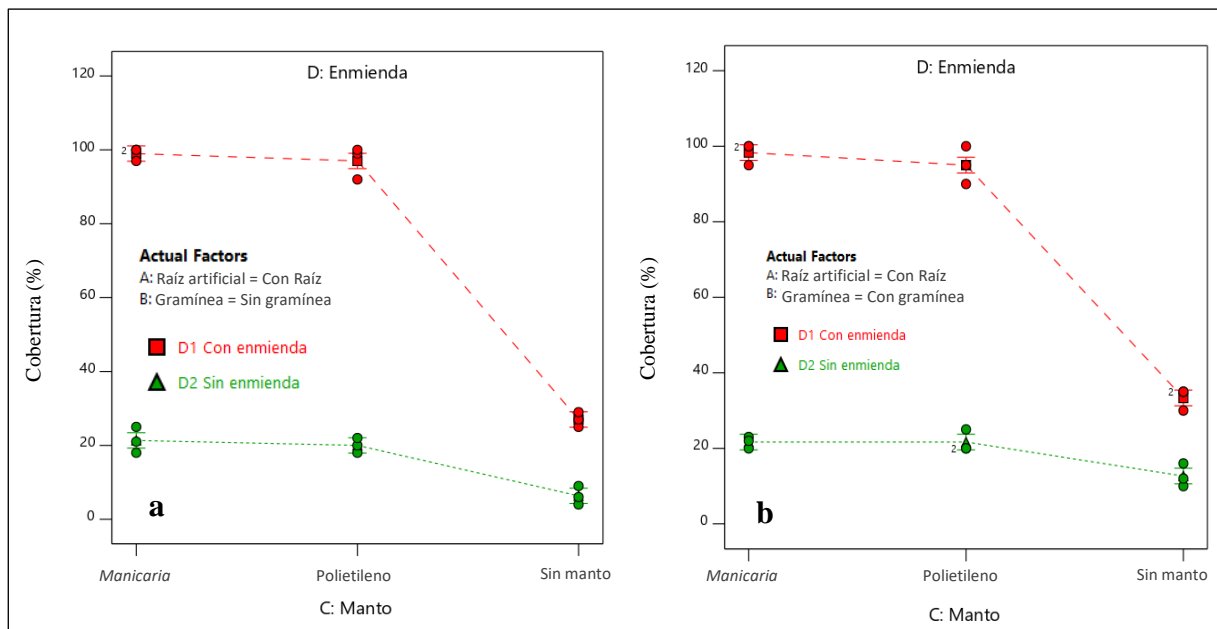


Figura 47. Efecto de los factores enmienda y manto, con interacción de los subfactores: con raíz artificial y sin gramínea (a); con raíz artificial y con gramínea (b), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 1, con suelo de textura arcillosa.

5.4.2.3. Efecto de los factores raíz artificial (A) y gramínea (B) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores sin manto (C3) y sin enmienda (D2). Se evidenció que la raíz artificial (A1), con la gramínea (B1) promueve el desarrollo de la cobertura en un 9 % más que cuando no hay raíz artificial (A2). Cuando no se incorpora la gramínea (B2), el valor de A1, se reduce a un 6 % en cobertura mientras que en A2, disminuye totalmente, como se muestra en la gráfica a, de la figura 48. Por lo anterior esta combinación entre tratamientos no fue viable, a pesar de que es superior a las unidades experimentales testigo.

5.4.2.4. Efecto de los factores raíz artificial (A) y gramínea (B) en el desarrollo de la cobertura con interacción del factor promedio manto (C) y sin enmienda (D2). En el subfactor con raíz artificial (A1) los valores en desarrollo de cobertura aumentaron un 5 %, por encima de las que no se incorporó raíz (A2). En cuanto a la aplicación de la gramínea no existen diferencias significativas entre aplicarla y no hacerlo, puesto que el desarrollo de la cobertura de la regeneración natural (RN) es similar conservando valores del 20 %, aun cuando no hubo aplicación de vermicompost como se muestra en la gráfica b de la figura 48.

5.4.2.5. Efecto de los factores raíz artificial (A) y gramínea incorporada (B) en el desarrollo de la cobertura con interacción del factor promedio manto(C) y con enmienda (D1). Con la aplicación de vermicompost, los valores de cobertura aumentaron significativamente en las unidades experimentales donde se encontraba la raíz artificial con valores promedio del 76 %, sin importar si se incorporó o no la gramínea. Cuando se incorporó vermicompost, pero no se implementó la raíz artificial, se presentó una disminución de la cobertura en un 5 % en presencia de la gramínea y un 16 % cuando no se aplicó esta como se muestra en la gráfica c de la figura 48. Lo que permite evidenciar que la raíz artificial contribuye a mejorar las condiciones de la unidad experimental para el desarrollo de la cobertura si se

combina con un tipo de manto y el vermicompost.

Es de destacar que cuando se implementaron las fibras de raíz artificial en las unidades experimentales, estas sirvieron de anclaje tanto para la gramínea incorporada como para la regeneración natural, y que su efecto se potencializó cuando se aplicó el vermicompost con los mantos.

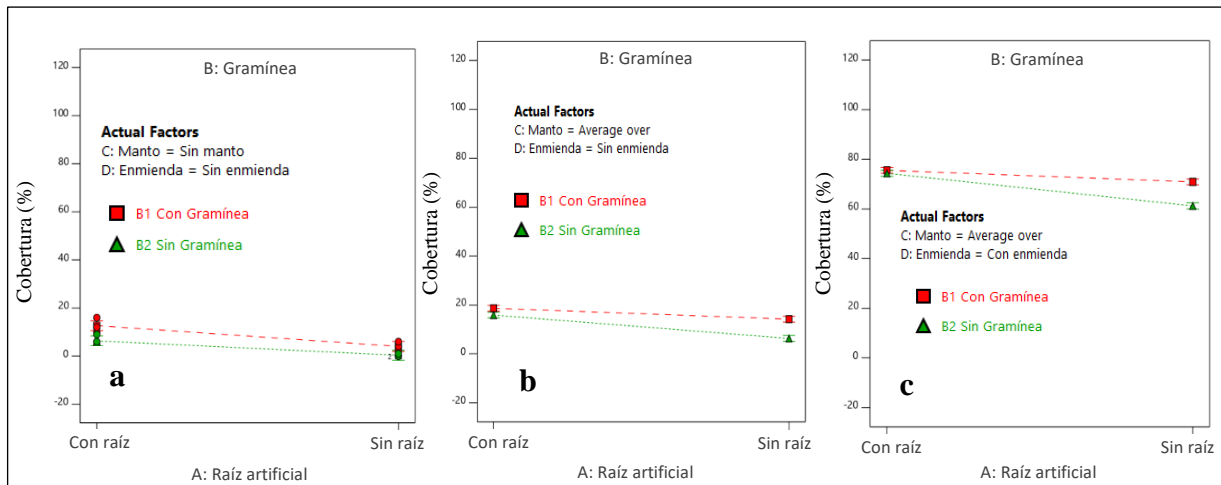


Figura 48. Efecto de los factores raíz y gramínea; con interacción de los subfactores: sin manto y sin vermicompost (a); valor promedio del manto y vermicompost (b); con valor promedio del manto y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 1, con suelo de textura arcillosa.

5.4.2.6. Efecto de los factores gramínea (B) y manto (C) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores con raíz (A1) y sin vermicompost (D2). Se evidenció que los valores de cobertura fueron similares (22 %), tanto cuando se aplicó la gramínea (B1) como cuando no se hizo (B2). Es decir que no se presentaron diferencias significativas en la implementación de la gramínea frente a la regeneración natural. El desarrollo de la cobertura se vio limitado debido a que no se aplicó la vermicompost. Por otro lado, cuando no se aplicaron los mantos (C3) el desarrollo de la cobertura se redujo para B1 a un 13 % y B2 al 6 % como se muestra en la gráfica a de la figura 49. Por lo cual la no presencia de los mantos impactó de manera significativa el desarrollo de cobertura, viéndose más afectado las unidades

experimentales donde prevalecía la regeneración natural (B2), que las unidades donde se había implementado la gramínea.

5.4.2.7. Efecto de los factores gramínea (B) y manto (C) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores sin raíz (A2) y con vermicompost (D1).

Cuando se incorporó el vermicompost, los valores de desarrollo de cobertura se incrementaron en presencia de los mantos (C1 y C2) para las unidades que tenían la gramínea (B1) a un 92 %, mientras que a las que no se les incorporó, es decir que se desarrollaba solo la regeneración natural (RN) fue de 87 %, como se muestra en la gráfica b de la figura 49. En las unidades experimentales a las que no se les establecieron mantos C3, los valores de B1 se redujeron a 31% y de B2 a 12 %, debido posiblemente a que cuando no se implementa los mantos, las partículas de suelo, vermicompost y vegetación se desprenden, por efecto de la inclinación y las condiciones ambientales a las que están expuestos.

5.4.2.8. Efecto de los factores gramínea (B) y manto (C) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores con raíz (A1) y con vermicompost (D1).

Cuando se incorporó la raíz artificial (A1), el vermicompost (D1), y se establecieron con los mantos (C1 y C2) se obtiene una cobertura promedio del 98 %, independiente de que se aplique la gramínea (B1) o no (B2), donde la regeneración natural es levemente superior a la cobertura que se obtiene con la aplicación de la gramínea. Cuando se conservó la combinación de tratamientos anteriormente mencionados, pero se eliminaron los mantos (C3), los valores de cobertura disminuyeron a 33 % para B1 y a 27 % para B2, como se muestra en la gráfica c, de la figura 49, evidenciando la importancia de los mantos para la rehabilitación de la ladera.

En general, el mejor desarrollo de cobertura se generó cuando se implementó la raíz artificial con la enmienda, el manto de *Manicaria* y la regeneración natural (A1-B2-C1- D1), otra manera

de obtener un efecto similar es combinar: la raíz artificial, con la enmienda el manto de *Manicaria* y la gramínea (A1 - B1 - C1 - D1). También se puede utilizar las mismas combinaciones, pero cambiando la *Manicaria* (C1) por el manto de polietileno (C2), generando las siguientes combinaciones (A1 - B1 - C2 - D1). o (A1 - B2 - C2 - D1). La diferencia ambiental radica en que las últimas composiciones, el polietileno no es biodegradable, y que cuando se usa B1, solo se incorpora una especie de gramínea que obedece al pasto puntero, mientras que cuando se usa B2, el desarrollo de cobertura depende de la regeneración natural, lo que implica mayor biodiversidad y adaptabilidad a las condiciones del sitio, además que se ahorra los costos de semilla e implementación. Los subfactores fundamentales son C1, C2 y D1 por ser los más eficientes para promover el desarrollo de coberturas en zonas de alta pendiente. Se destaca que, si el vermicompost se aplica sin los mantos, parte de esta termina perdiéndose por el proceso de erosión Hídrica.

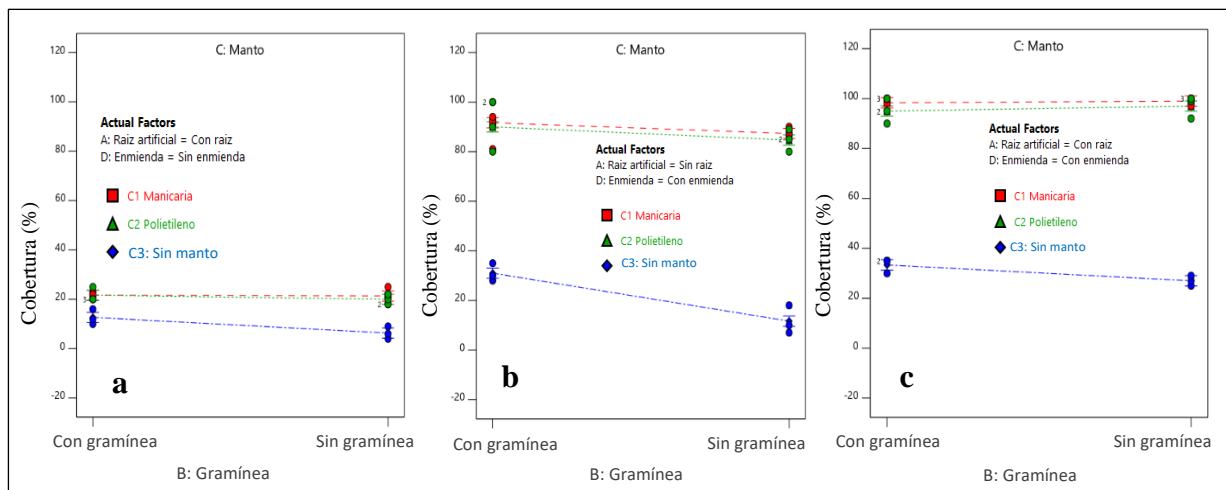


Figura 49. Efecto de los factores gramínea y mantos con interacción de los subfactores: con raíz y sin raíz y vermicompost (a); sin raíz y con vermicompost (b); con raíz y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 1, con suelo de textura arcillosa.

5.4.3. Análisis de la efectividad de los tratamientos en el desarrollo de coberturas verdes en la zona media 2, con suelos de textura franco-arcillosa.

Para la zona media 2 con predominio de suelo con textura franco-arcillosa, se encontraron

diferencias estadísticamente significativas (ver ANOVA en el anexo 29) entre los factores: raíz artificial (A), gramínea (B), Manto (C), Enmienda (D) y las combinaciones AB, AC, AD, BC, CD, ABC, ABD, ACD, BCD, ABCD. Dentro de estos factores existen subfactores que son determinantes en el desarrollo de cobertura como se describe a continuación.

5.4.3.1. Efecto de los factores manto (C) y enmienda (D2) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores: con raíz (A1) y sin gramínea (B2). Se evidenció un desarrollo total de cobertura de 100 % cuando se implementó el manto de *Manicaria* (C1) y 99 % con el de polietileno (C2), y que distaron significativamente cuando no se implementó manto (C3) con 28 %. Cuando no se aplicó el vermicompost (D2), la efectividad de los mantos se redujo de manera significativa, 25% para C1 y 22 % C2, mientras que para C3 tomo un valor mínimo de 8 % como se muestra en la gráfica a de la figura 50. Lo anterior permite ver t

5.4.3.2. Efecto de los factores manto (C) y enmienda (D) en el desarrollo de cobertura, cuando interactúan los subfactores: con gramínea (B1), y con raíz Artificial. En este caso al implementar el vermicompost (D1), la cobertura en los dos tipos de manto (C1 y C2) se mantuvo al 100 %, mientras que cuando no se instaló manto (C3) presentó un valor al de 69 %. Al no implementar el vermicompost (D2), la cobertura se redujo a un 37 % en C1 y C2, y en 16 % para C3 como se muestra en la gráfica b de la figura 50. Por lo anterior se evidenció que el vermicompost define en gran medida el desarrollo de la vegetación, y que el resultado en porcentaje de cobertura es igual si se aplica o no la gramínea, ya que la regeneración natural iguala y en algunos casos la supera. Es de tener en cuenta que esta zona con clase textural franco arcillosa, brinda mejores condiciones que la zona media 1, para el desarrollo de la cobertura vegetal, aun cuando no se aplique vermicompost, por lo cual resulta más fácil su rehabilitación.

La presencia de los mantos fue fundamental para la rehabilitación en las unidades experimentales, siendo así que tanto el manto orgánico como el inorgánico presentaron una efectividad similar, ya que cuando no se aplicaron, el desarrollo de las coberturas se redujo, debido a que se limitó el anclaje de la planta, así como la retención de las partículas del suelo.

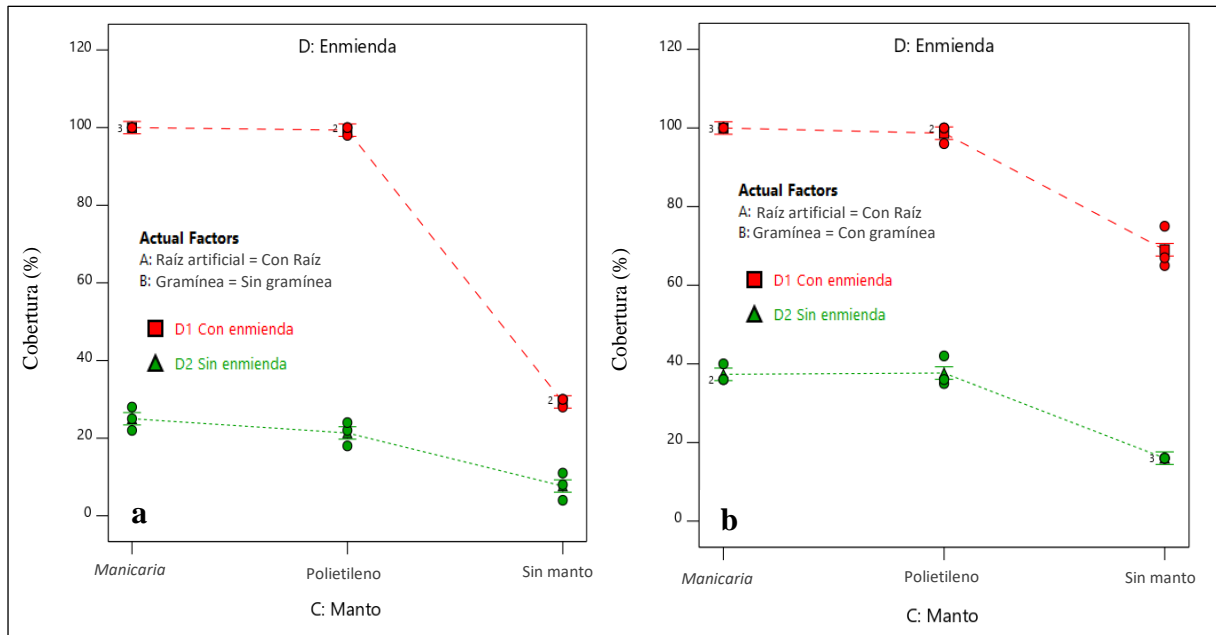


Figura 50. Efecto de los factores enmienda y manto con interacción de los subfactores: con raíz y sin gramínea (a); con raíz y con gramínea (b), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 2, con suelo de textura franco arcillosa.

5.4.3.3. Efecto de los factores raíz artificial (A) y gramínea (B) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores sin manto (C3) y sin vermicompost (D2). La implementación de la raíz artificial (A1), junto con la gramínea (B1) presentó un valor de 16 % en desarrollo de la cobertura, mientras que cuando no hubo raíz (A2) fue de 5 %. Ahora bien, cuando no se incorporó vegetación (B2), el valor de A1, se redujo a la mitad, mientras que en A2, el valor fue tendiente al 0 %, teniendo en cuenta que en ninguno de estos casos hubo implementación de mantos ni de enmienda, como se muestra en la gráfica a de la figura 51. Por lo anterior, se debe tener en cuenta que cuando se implementa la raíz artificial, así se incorpore la

gramínea, estos no presentan una efectividad importante, ya que al no contar con la combinación de mantos y vermicompost los valores de la cobertura no son significativos.

5.4.3.4. Efecto de los factores raíz artificial (A) y gramínea (B) en el desarrollo de la cobertura con interacción del factor promedio manto (C) y sin vermicompost (D2). En este caso se puede evidenciar que la cobertura es mayor en presencia de la gramínea (B1) con valores para A1 del 30 % y en A2 del 20 %; mientras que cuando no se incorpora la gramínea B2, y prevalece la regeneración natural, los valores para A1, son de 18 % y de A2, del 8 % como se muestra en la gráfica b de la figura 51; por lo cual, los mantos con la raíz artificial sin presencia del vermicompost presentaron una influencia regular en el desarrollo de la cobertura de las unidades experimentales.

5.4.3.5. Efecto De Los Factores raíz artificial (A) y gramínea incorporada (B) en el desarrollo de la cobertura con interacción del factor promedio manto(C) y con vermicompost (D1). Cuando se incorpora el vermicompost (D1) a las unidades experimentales, los valores de cobertura aumentaron significativamente para la raíz artificial (A1) con 89 % en presencia de la gramínea (B1), y del 76 % sin incorporación de vegetación (B2). mientras que para A2 fue de 76 % con B1. Y de 65 % con B2, como se muestra en la gráfica c de la figura 51. Por lo anterior, la raíz artificial presenta por si sola presenta una influencia mínima en el desarrollo de las coberturas, pero que facilita el anclaje de las raíces naturales de la flora herbácea, condición que se potencializa en gran medida con la presencia de los mantos y la incorporación del vermicompost. Cuando se aplicó la gramínea los valores fueron levemente superiores a la cobertura obtenida por la regeneración natural con presencia de la raíz artificial, por lo cual de no existir los recursos económicos disponibles para su implementación los subfactores A1 y B1 podrían ser sustituidos.

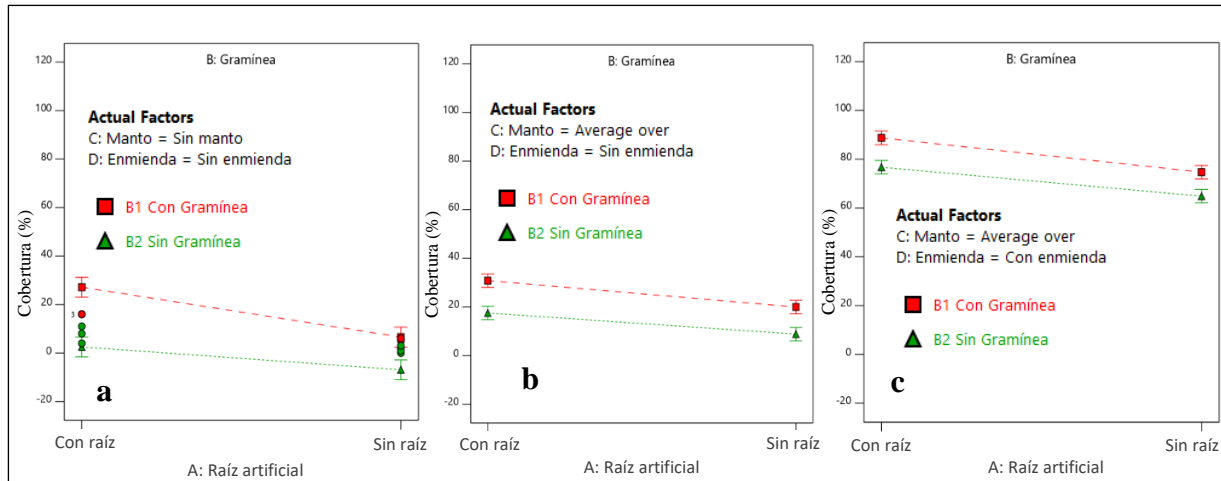


Figura 51. Efecto de los factores raíz y vegetación; con interacción de los subfactores: sin manto y sin vermicompost (a); manto promedio y sin vermicompost (b); con manto promedio y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 2, con suelo de textura franco arcillosa.

5.4.3.6. Efecto de los factores gramínea (B) y manto (C) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores con raíz (A1) y sin vermicompost (D2). En este caso se evidenció que en ausencia del vermicompost y con presencia de los mantos el desarrollo de cobertura de B1 es del 37 %, mientras que en C3 los valores son inferiores al 18 % como se muestra en la gráfica a de la figura 52. Estos valores de cobertura se redujeron cuando no hubo aplicación de la gramínea y solo hubo desarrollo de la regeneración natural, evidenciando que la efectividad de estos tratamientos depende en gran medida de la presencia del vermicompost, debido probablemente a los aportes de nutrientes de este material.

5.4.3.7. Efecto de los factores gramínea (B) y manto (C) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores sin raíz (A2) y con vermicompost (D1). En ausencia de la raíz artificial (A2) y la no aplicación de mantos (C3), el desarrollo de cobertura cuando se aplicó la gramínea (B1) fue de 36 % y sin la aplicación de esta (B2) fue de 14%, aun cuando se había implementado el vermicompost. Por lo cual, cuando se cambió la situación y se implementaron los dos tipos de manto los valores de desarrollo de cobertura se incrementaron

para B1, con un 94 % y para B2 con 91 % como se muestra en la gráfica b de la figura 52.

5.4.3.8. Efecto de los factores gramínea (B) y manto (C) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores con raíz (A1) y con vermicompost (D1). El porcentaje de cobertura llega a un 100 % para B1 y B2 con presencia de los dos tipos de mantos y la raíz artificial. Mientras que cuando estos no estuvieron presentes, los valores se redujeron a 69 % para B1 y a 29 % para B2 como se muestra en la gráfica c de la figura 52. De manera general, se evidencia que las combinaciones para obtener los mejores resultados en el desarrollo de la cobertura se obtienen cuando se combina el vermicompost con la raíz artificial, el manto de *Manicaria* y la gramínea (A1 - B1 - C1 - D1) de igual manera se puede obtener una efectividad similar sustituyendo la gramínea por la regeneración natural (A1 - B2 - C1 - D1) también se puede llegar a porcentaje de coberturas similares al cambiar el manto de *Manicaria* por el de polietileno de la siguiente manera (A1 - B1 - C2 - D1 o A1 - B2 - C2 - D1). Se resalta que la aplicación de gramíneas (B1) tuvo un comportamiento superior a la regeneración natural (B2) cuando no se implementaron mantos (C3), en el suelo de textura franco arcilloso. En cuanto a la raíz artificial esta por sí sola no promueve un desarrollo alto de la cobertura, sin embargo, cuando se combina con los mantos y el vermicompost, genera el máximo desarrollo. Por lo anterior es de destacar que la velocidad de la rehabilitación depende en gran medida de la combinación de los subfactores, es así que para disminuir los costos de implementación se podría omitir A1 y B1; sin embargo, la cobertura llevaría un tiempo más prolongado para su recuperación.

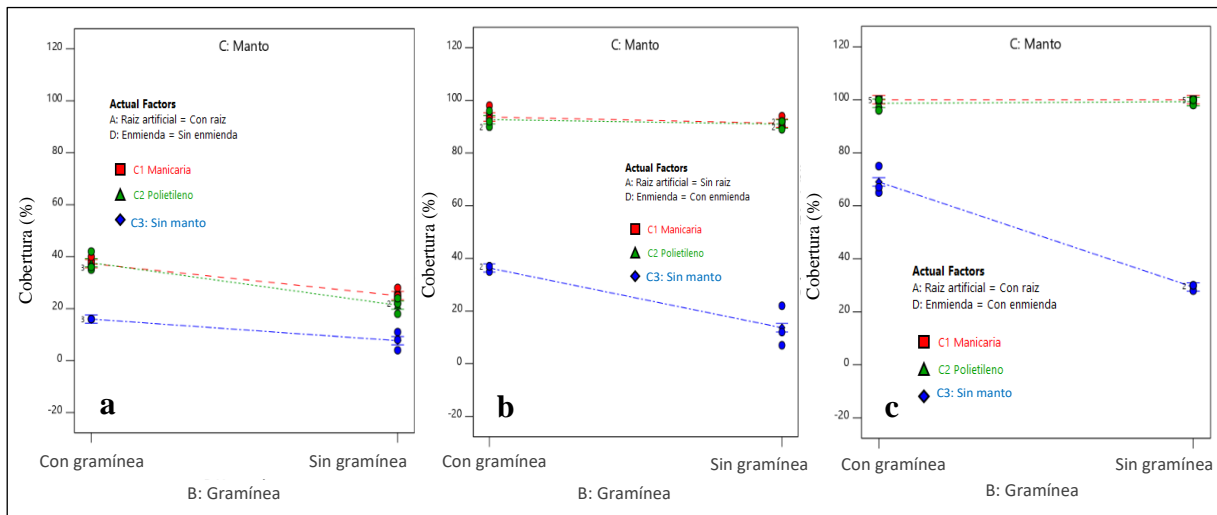


Figura 52. Efecto de los factores gramínea y mantos con interacción de los subfactores: con raíz y sin vermicompost (a); sin raíz y con vermicompost (b); con raíz y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 2, con suelo de textura franco arcillosa.

5.4.4. Análisis de la efectividad de los tratamientos en el desarrollo de coberturas verdes en la zona media 3, con suelos de textura franca.

Para la zona media 3 con predominio de suelo con textura franca, se encontraron diferencias estadísticamente significativas (ver ANOVA en el anexo 30) entre los factores: raíz artificial (A), vegetación incorporada (B), manto (C), enmienda (D) y sus combinaciones A, B, C, D, AC, BC, CD, ABC, ACD, BCD. Teniendo en cuenta que dentro de estos factores existen subfactores que determinan la efectividad del tratamiento en el desarrollo de cobertura como se describen a continuación.

5.4.4.1. Efecto de los factores manto (C) y enmienda (D) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores: con raíz (A1) y sin gramínea (B2). Se dio un desarrollo de la cobertura vegetal del 100 % para C1 y C2 cuando se implementó el vermicompost (D1), la raíz artificial y no se incorporó gramínea (B2), valor que distó significativamente de C3 el cual tuvo un 27 % de cobertura. Al eliminar la aplicación del

vermicompost (D2) la efectividad en el factor mantos (C1, C2 y C3) se redujo significativamente en todos los casos, como se muestra en la gráfica a de la figura 53.

5.4.4.2. Efecto de los factores manto (C) y enmienda (D) en el desarrollo de cobertura, cuando interactúan los subfactores: con gramínea (B1), y con raíz Artificial (A1). Cuando se incorporó la gramínea (B1) junto con el vermicompost (D1) la cobertura se mantuvo en 100 % para C1 y C2, mientras que en C3 se generó un aumento al 69 % con respecto a cuando no se aplicó la gramínea (B2), como se muestra en la gráfica b de la figura 53, por lo cual B1 tuvo la misma influencia que la regeneración natural en desarrollo de cobertura cuando se implementaron los mantos. Se destaca que la aplicación de B1 favoreció el desarrollo de cobertura en ausencia de los mantos (C3), pero cuando no se aplicó vermicompost (D2), los valores de cobertura se redujeron de manera significativa por debajo del 42 %. Por lo anterior se destaca que a pesar de que los mantos son efectivos en el control de la erosión hídrica, son ineficaces en el desarrollo de la cobertura si no hay presencia de la vermicompost, o de un suelo fértil. Así mismo no existe diferencia significativa entre usar el manto de *Manicaria* y el de polietileno siendo los dos viables para la rehabilitación de la zona media 3 con predominio del suelo con textura franco. Tampoco hay diferencia significativa en el desarrollo de la cobertura al aplicar o no la gramínea, es decir que cuando no hay aplicación de esta, la regeneración natural se desarrolla de manera óptima

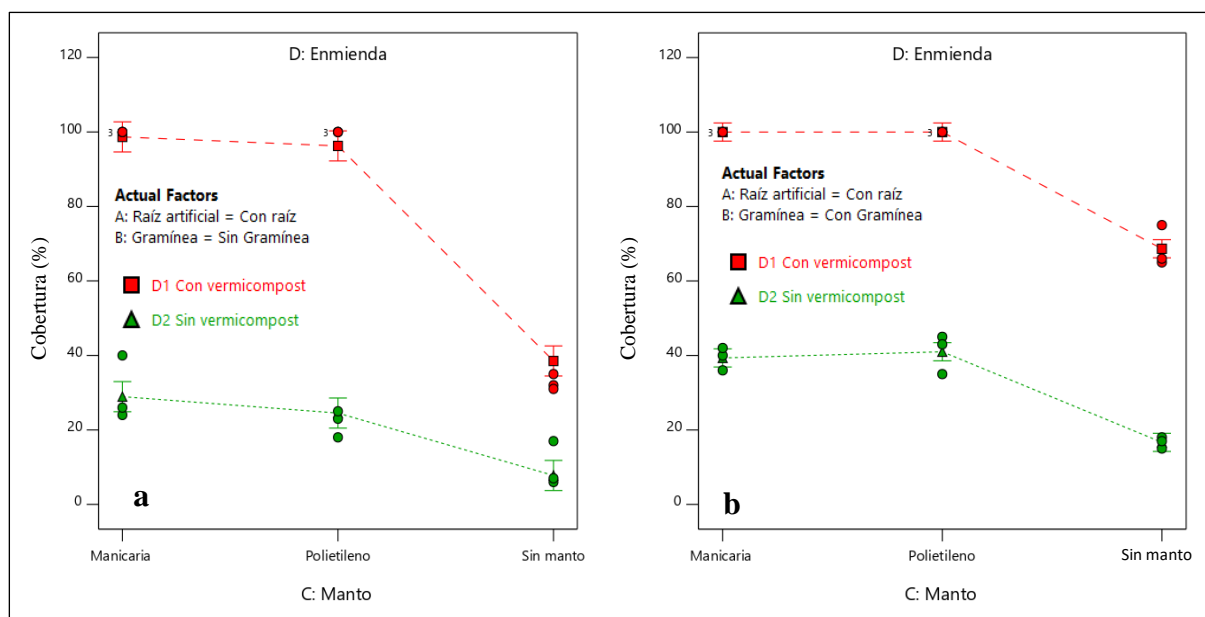


Figura 53. Efecto de los factores enmienda y manto con interacción de los subfactores: con raíz y sin gramínea (a); con raíz y con gramínea (b), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 3, con suelo de textura franca.

5.4.4.3. Efecto de los factores raíz artificial (A) y gramínea (B) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores sin manto (C3) y sin vermicompost (D2). Se evidenció que cuando se implementó la gramínea (B1) sin manto (C3) y sin vermicompost (D2), el valor de A1 fue de 17 % mientras que en A2 fue de 5 % en el desarrollo de cobertura, pero al no incorporar vegetación (B2), el valor de A1, se redujo en un 10 % mientras que en A2, disminuyó al 1 %, como se puede ver en la gráfica a de la figura 54.

5.4.4.4. Efecto de los factores raíz artificial (A) y gramínea (B) en el desarrollo de la cobertura con interacción del factor promedio manto (C) y sin vermicompost (D2). Cuando no se aplicó la vermicompost (D2) pero si se incorporó la gramínea (B1) se generaron valores de cobertura para A1 del 32 % y en A2 del 21 %; mientras que, en ausencia de la gramínea (B2), los valores para A1 fueron del 21 % y de A2, del 10%. Al implementar el vermicompost (D1), los valores en cobertura aumentaron significativamente para A1 en 90% con B1, y del 76 % sin

incorporación de la gramínea (B2). El porcentaje de cobertura disminuyó cuando no se implementó la raíz artificial como se muestra en la gráfica b de la figura 54.

5.4.4.5. Efecto de los factores raíz artificial (A) y gramínea incorporada (B) en el desarrollo de la cobertura con interacción del factor promedio manto (C) y con vermicompost (D1). Se determinó que la raíz artificial influye en el desarrollo de las coberturas ya que su aplicación facilita el anclaje de las raíces naturales de la flora herbácea en el suelo, pero que esta condición perdió efectividad, en ausencia de los mantos; ya que tanto las partículas de suelo como la vegetación al quedar expuestos a los procesos de erosión hídrica, impactan en el desarrollo de la cobertura. La aplicación del vermicompost (D1) permitió que los valores de cobertura aumentaran tanto para A1 como en A2, generando el mayor porcentaje de cobertura cuando se aplicó la gramínea B1, en un 90 % de cobertura y a un 78 % cuando solo se desarrolló la regeneración natural (B2) como se muestra en la gráfica c de la figura 54.

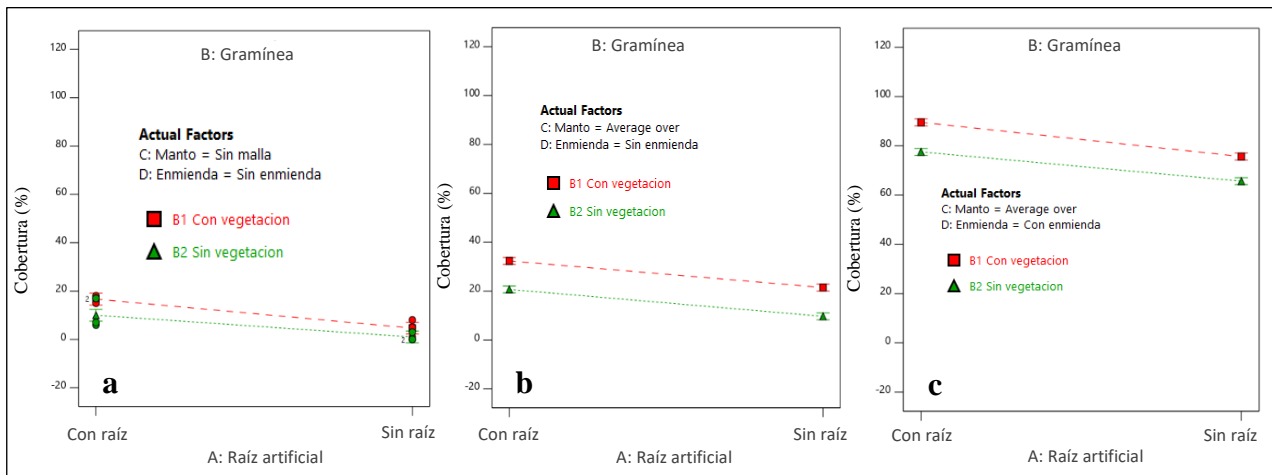


Figura 54. Efecto de los factores raíz y vegetación; con interacción de los subfactores: sin malla y sin vermicompost (a); promedio manto y sin vermicompost (b); promedio manto y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 3, con suelos de textura franca.

5.4.4.6. Efecto de los factores gramínea (B) y manto (C) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores con raíz (A1) y sin vermicompost (D2). Se

evidenció que cuando no se aplica el vermicompost (D2) y se establecen los mantos, el desarrollo de cobertura con la aplicación la gramínea (B1) fue del 39 % y cuando no se aplicó (B2). Los valores variaron para cada manto debido a 30 % para C1 y de 22 % en C2, mientras que C3 presentó los valores más bajos de cobertura como se muestra en la gráfica a de la figura 55. Es de resaltar que tanto la malla de *Manicaria* como la de polietileno presentaron valores similares para el desarrollo de cobertura cuando se aplicó la gramínea, pero que en ausencia del vermicompost la *Manicaria* favoreció el desarrollo de la regeneración natural.

5.4.4.7. Efecto de los factores gramínea (B) y manto (C) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores sin raíz (A2) y con vermicompost (D1). Cuando no se aplicó raíz artificial (A2), pero si se implementó el vermicompost (D1), los valores de desarrollo de cobertura se incrementaron en la *Manicaria* (C1) al 96 % con la aplicación de la gramínea (B1) y de 93 % sin gramínea (B2). Para las unidades experimentales que no se implementó manto, el desarrollo de cobertura fue bajo, como se muestra en la gráfica b de la figura 55.

5.4.4.8. Efecto de los factores gramínea (B) y manto (C) en el desarrollo de la cobertura con interacción de los subfactores con raíz (A1) y con vermicompost (D1). Se obtuvieron valores de cobertura del 100 %, con la misma efectividad en los mantos de *Manicaria* y polietileno (C1 y C2) cuando se implementó el vermicompost (D1), teniendo en cuenta que la incorporación de la gramínea (B1), frente al desarrollo de la regeneración natural (B2) no presentaron diferencias significativas, como se muestra en la gráfica c de la figura 55. Mientras que si se evidenciaron diferencias en cobertura al no establecer los mantos (C3) con un 70 % para B1 y un 33 % para B2. Por lo cual, en esta zona con suelo de textura franca, el desarrollo de la gramínea con el vermicompost es superior a la regeneración natural cuando no hay presencia

de C1 y C2.

En términos generales se evidencia que las mejores combinaciones para el desarrollo de la cobertura en la zona media 3 son: A1 - B1 - C1 - D1; A1 - B1 - C2 - D1; A1 - B2 - C1 - D1 y A1 - B2 - C2 - D1. Donde las condiciones de la ladera son un factor determinante al permitir la acción de los tratamientos, que para el caso en particular, la zona con suelo de textura franco, facilitó el desarrollo de la cobertura con la incorporación de la gramínea aun cuando no se implementara mantos ni vermicompost, situación que fue similar a la zona con suelo de textura franco arcillosa, pero que al quedar las unidades experimentales expuestas a las condiciones del entorno, su éxito es mínimo; ya que tanto el suelo como la vegetación se comprometen por los efectos de la erosión hídrica.

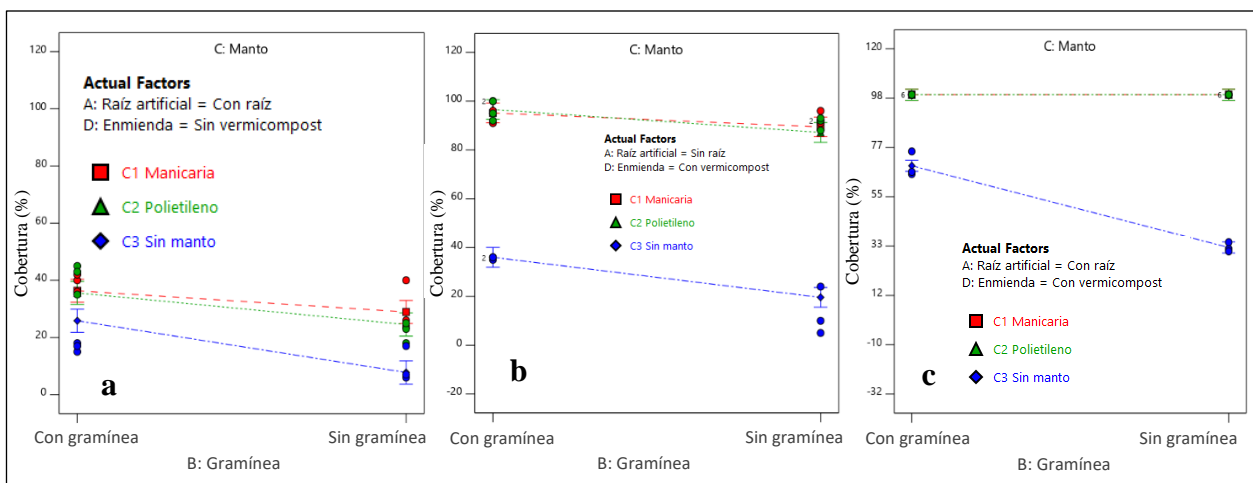


Figura 55. Efecto de los factores gramínea y mantos con interacción de los subfactores: con raíz y sin vermicompost (a); sin raíz y con vermicompost (b); con raíz y con vermicompost (c), sobre el desarrollo de la cobertura en la zona media 3, con suelo de textura franco.

5.4.5. Estimación de las pérdidas de suelo en las zonas rehabilitadas (A2) ($\text{mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), considerando los valores de cobertura (C) y prácticas de conservación (P) implementados en el área objeto de estudio

Se realizó un análisis comparativo entre las pérdidas del suelo estimadas del diagnóstico de

las zonas degradadas (perdidas máximas), frente a las pérdidas de suelo estimadas con la implementación de los factores de cobertura (C) y prácticas de conservación (P), obtenidos en la rehabilitación de las zonas de ladera objeto de estudio,

5.4.5.1. Valores de los factores C y P, para cada una de las zonas de la ladera obtenidos con los mejores tratamientos implementados en el área de estudio. Los valores del factor (C) se estimaron de acuerdo con el tipo de cobertura obtenidos para cada zona, donde la zona de cultivo, a la cual no se aplicó ningún tratamiento, continuo con sus mismos valores teniendo en cuenta que por presentar una plantación de cítricos y forestales, se le asigno el valor de C de 0,090, semejante a café bajo sombra según los criterios de Dissmeyer y Foster (1983) y Delgado y Vázquez (1997). Mientras que el factor P fue de 0,875 por presentar siembra en contorno. Para las zonas alta y baja, como la rehabilitación fue con especies forestales con enmiendas orgánicas, y alrededor de los árboles se desarrollaron asociaciones densas de plantas herbáceas, el factor C asignado fue de 0,003, por ser similar a la descripción de bosque claro con substrato herbáceo (Delgado y Vázquez, 1997). El factor P correspondió a 1, ya que no se realizaron prácticas de conservación, por ser las zonas con menor pendiente. Para las zonas media 1, 2 y 3, de mayor inclinación, correspondió el valor de 0,003, para el factor C, debido a que las coberturas que se desarrollaron obedecían en su mayoría a pastizales densos sin pastoreo, mientras que a el factor P, tomo el valor de 0,510, teniendo en cuenta que los mantos se relacionaron con la eficiencia de las barreras simples de pasto denso por ser un valor intermedio en el factor de conservación, pero que se considera que se necesita estudiar de manera específica el manto de *Manicaria* y el de polietileno para determinar con exactitud el factor P, ya que el autor considera que este valor se puede reducir, teniendo en cuenta la efectividad de los mantos en el control de la erosión.

5.4.5.2. Estimación de las pérdidas de suelo en las zonas rehabilitadas, (A2) (mg ha-1 año-1) considerando los valores de (C) y (P) en las zonas de ladera objeto de estudio. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas como se puede ver en el ANOVA del anexo 31. Siendo así que la zona de cultivo fue la que presentó las mayor estimación de las pérdidas de suelo con un valor de $8,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, y distó con respecto a zona alta, media 1, media 2, media 3 y baja, las cuales presentaron valores menores a $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ como se muestra en la gráfica B de la figura 56, En términos generales con la implementación de los tratamientos de cobertura y prácticas, que representan a los factores C y P, los valores estimados de pérdidas de suelo se redujeron significativamente en las zonas rehabilitadas, donde la vegetación además de brindar protección superficial al suelo contribuye a mejorar la estabilidad de la ladera a través de sus componentes mecánicos e hidráulicos como lo plantea Liu y Feng (2016).

5.4.5.3. Comparativo de las pérdidas de suelo (mg ha-1 año-1) entre los resultados del diagnóstico (perdidas máximas) de la zona degradada (A), frente a los resultados de los tratamientos para los factores C y P en la zona rehabilitada (A2). En la Figura 56 se muestra la gráfica A, que corresponde a los resultados del diagnóstico de estimación de pérdidas de suelo (A) cuando el área estaba degradada, mientras que la gráfica B, corresponde a los resultados calculados para estimación de pérdidas de suelo cuando se implementaron los factores C y P en la rehabilitación ambiental de la zona de estudio. Se puede observar que la zona de cultivo no fue intervenida en la investigación, paso de ser la que presentaba las menores pérdidas de suelo (8,5) cuando las zonas se encontraban degradadas como se muestra en la gráfica A de la figura 56, a ser la que presentaba las mayores pérdidas de suelos estimadas con el mismo valor frente a las zonas rehabilitas que se muestran en la gráfica B de la figura 56; ya que estas últimas

registraron valores menores a 1 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

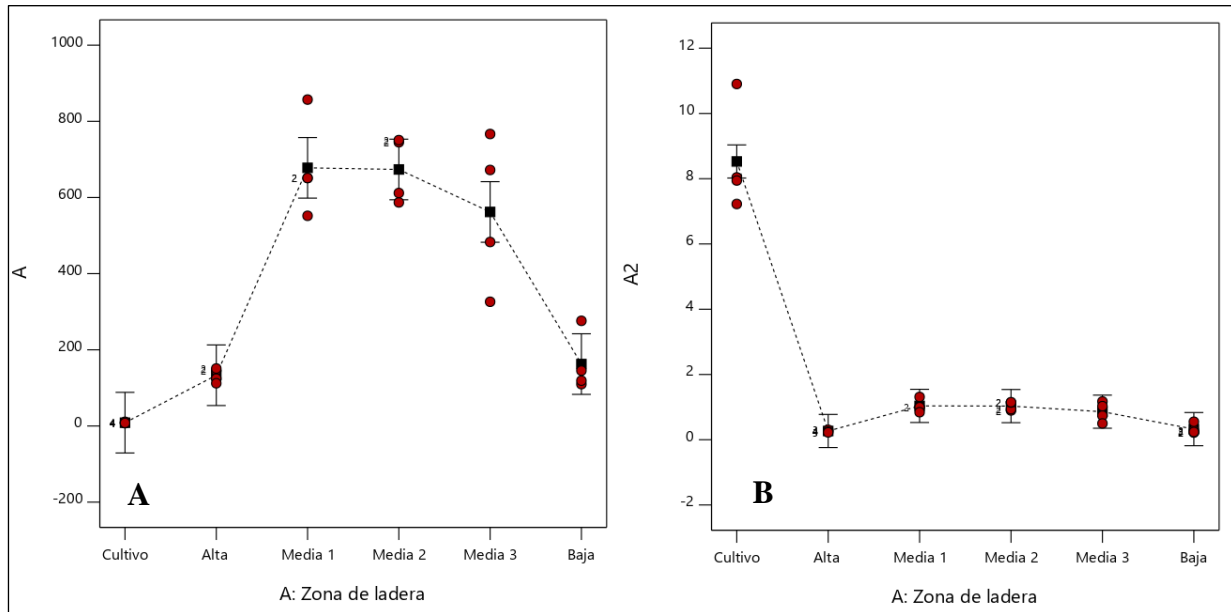


Figura 56. Comparación entre las estimaciones de pérdidas del suelo encontradas en la fase de diagnóstico cuando el área se encontraba en proceso de degradación (A), frente a la estimación de pérdidas cuando se implementaron los factores C y P obtenidos de los mejores tratamientos con los que se rehabilitaron las unidades experimentales en la zona objeto de estudio (B).

5.5. **Peso ecológico de las especies de la regeneración natural en la rehabilitación ambiental del área objeto de estudio.**

En este capítulo se da respuesta al último objetivo relacionado con el peso ecológico de las especies de la regeneración natural. Por lo cual se describe la composición florística de la regeneración natural, su abundancia, dominancia y frecuencia, con los cuales se determinó el índice de valor de importancia (IVI) como se puede ver en los siguientes apartados.

Tabla 21. Composición florística de la regeneración natural que se desarrolló en las unidades experimentales de la zona media de la ladera.

Nº	Nombre Vulgar	Nombre Científico	Nº de unidades experimentales en que está presente la especie.	Abundancia		Frecuencia		Dominancia		IVI
				Aa	Ar %	Fa	Fr %	Da	Dr %	
1	Pacunga	<i>Bidens pilosa</i>	35	79	7,149	32,407	7,609	12320	4,055	18,813
2	Dormidera	<i>Mimosa pudica</i>	22	56	5,068	0,370	4,783	6201	2,041	11,891
3	Zapato	<i>Centrosema pubescens</i>	5	16	1,448	4,630	1,087	1809,3	0,596	3,130
4	Cadillo	<i>Cenchrus brownii</i>	21	37	3,348	19,444	4,565	1989,5	0,655	8,568
5	Grama	<i>Cynodon dactylon</i>	60	72	6,516	55,556	13,043	19816	6,522	26,081
6	Verdolaga	<i>Portulaca oleracea</i>	15	23	2,081	13,889	3,261	4574,8	1,506	6,848
7	Pasto estrella	<i>Cynodon nlemfuensis</i>	18	50	4,525	16,667	3,913	8452	2,782	11,220
8	Pasto paja	<i>Digitaria sanguinalis</i>	15	75	6,787	13,889	3,261	14312	4,711	14,759
9	Verbesina	<i>Synedrella nodiflora</i>	5	6	0,543	4,630	1,087	1082,5	0,356	1,986
10	Sabana	<i>Paspalum notatum</i>	85	280	25,339	8,704	8,478	95935	31,575	75,393
11	Cilantron cimarron	<i>Eryngium foetidum</i>	10	14	1,267	9,259	2,174	2758,9	0,908	4,349
12	Chilco	<i>Baccharis latifolia</i>	24	35	3,167	22,222	5,217	8976	2,954	11,339
13	Pasto puntero	<i>Hyparrhenia rufa</i>	34	140	12,670	1,481	7,391	38504	12,673	32,734
14	Calopo	<i>Calopogonium mucunoides</i>	10	15	1,357	9,259	2,174	1754	0,577	4,109
15	Hierba de sapo	<i>Euphorbia hirta</i>	8	23	2,081	7,407	1,739	6987,6	2,300	6,120
16	Campanita	<i>Ipomea purpurea</i>	5	12	1,086	4,630	1,087	11050	3,637	5,810
17	Falsa ochua	<i>phisalis angulata</i>	3	8	0,724	2,778	0,652	7658,8	2,521	3,897
18	Caraquito	<i>lantana trifolia</i>	6	12	1,086	5,556	1,304	1210	0,398	2,789
19	Lulo	<i>Solanum quitoense</i>	3	12	1,086	2,778	0,652	8000,8	2,633	4,371
20	Lulo de perro	<i>Solanum hirtum</i>	22	39	3,529	0,370	4,783	18982	6,248	14,560
21	Oreja de alce	<i>Emilia sonchifolia</i>	19	27	2,443	7,593	4,130	7612	2,505	9,079
22	Pega	<i>Aeschynomene americana</i>	24	51	4,615	22,222	5,217	12100	3,983	13,815
23	Ortiga	<i>Laportera aestuans</i>	6	16	1,448	5,556	1,304	9100	2,995	5,747
24	Cope	<i>Ficus pallida</i>	1	2	0,181	0,926	0,217	1019,4	0,336	0,734
25	Igua	<i>Albizia guachapele</i>	1	1	0,090	0,926	0,217	1078,6	0,355	0,663
26	Diente de leon	<i>Taraxacum officinale</i>	2	2	0,181	1,852	0,435	198,7	0,065	0,681
27	Limoncillo	<i>Siparuna guianensis</i>	1	2	0,181	0,926	0,217	345,2	0,114	0,512
TOTAL				1105	100	425,93	100	303828,1	100	300

5.5.1. Composición florística de la regeneración natural encontrada en las unidades experimentales de las zonas objeto de estudio.

Se identificaron 27 especies con 1105 individuos en 108 unidades experimentales en las zonas de la parte media de la ladera, de las cuales 25 pertenecen a la flora herbácea, y 2 a la arbórea (*Albizia guachapele* y *Ficus pallida*) (Tabla 21), con un área de ocupación de: 303828,1 cm².

5.5.2. Peso ecológico de las especies de la regeneración natural (RN).

El inventario de la composición florística en el diagnóstico de la zona objeto de estudio, tenía como finalidad encontrar relaciones de propagación de la vegetación entre la que se encontraba en el área de influencia de la zona de estudio y la regeneración natural (RN) que se desarrollaba en las Unidades experimentales rehabilitadas. Por lo cual al analizar el peso ecológico de la RN se encontró relación con dos especies arbóreas (*Albizia guachapele* y *Ficus pallida*), mientras que en la flora herbácea la relación se mantuvo con 3 especies (*Bidens pilosa*, *Cenchrus brownii*, *Cynodon nlemfuensis*), es decir que de las 27 especies encontradas en las UE de la RN, se establecieron 22 que no presentaron relación con las inventariadas inicialmente y que permiten ver el desarrollo diverso de flora cuando se generaron condiciones básicas para su reproducción en las zonas de mayor inclinación de la ladera. En la figura 57, se aprecia de mayor a menor el índice de valor de importancia de las especies de la regeneración natural, siendo así que las que presentaron mayor IVI fueron sabana (*Paspalum notatum*), puntero (*Hyparrhenia rufa*) y grama (*Cynodon dactylon*); seguido de pacunga (*Bidens pilosa*), pasto paja (*Digitaria sanguinalis*), lulo de perro (*Solanum hirtum*), pega (*Aeschynomene americana*), dormidera (*Mimosa pudica*), Chilco (*Baccharis latifolia*) y pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*). Las más abundantes frecuentes y dominantes fueron en su mayoría las gramíneas, aunque se pudo evidenciar que hay otras especies que coexisten entre ellas y presentaron un buen desarrollo; mientras que las que no se nombraron por tener un IVI menor al 10 % indican que tienen un proceso de colonización más lento pero que contribuyen de manera significativa con la biodiversidad, impacto paisajístico positivo y sostenibilidad del área.

Los resultados de este estudio permitieron generar nuevos conocimientos y técnicas complementarias a la bioingeniería de suelo, con beneficios potenciales para el desarrollo de la

cobertura y disminución de las pérdidas de suelo, documentando valores técnicos, ecológicos, con un enfoque en reducción de costos para la rehabilitación de ladera y beneficios sociales para la comunidad, lo que se relaciona con lo planteado por Rey *et al.*, 2019, para que un proyecto de bioingeniería tenga éxito.

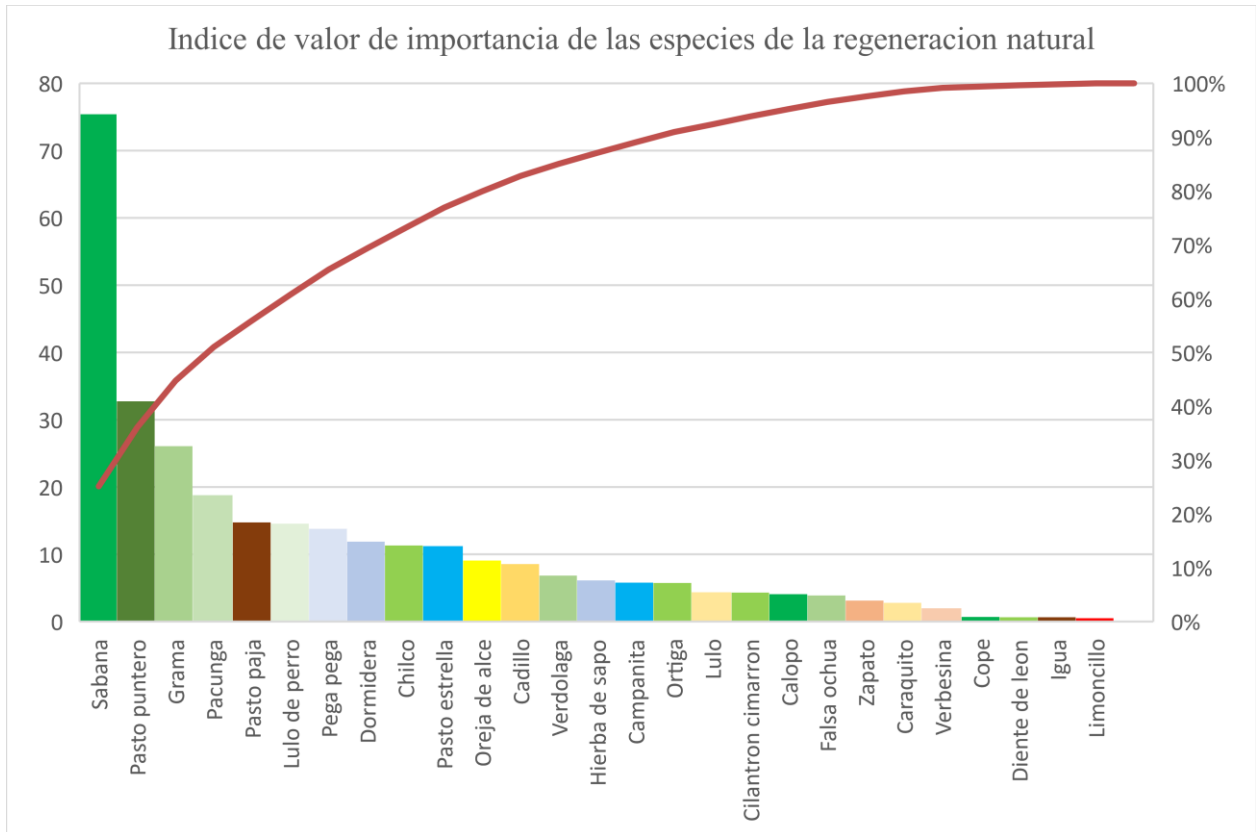


Figura 57. Índice de valor de importancia de las especies de la RN encontradas en las unidades experimentales de la zona media de la ladera.

A continuación de manera general se presentan evidencias graficas de los cambios en la cobertura que presentó la ladera objeto de estudio. El bloque A, de la figura 58, muestra los registros fotográficos de la zona cuando se encontraba expuesta a los procesos de degradación. Por su parte el bloque B, muestra el área con la rehabilitación de la cobertura mediante los tratamientos experimentales (bloque b, Figura 58).



Figura 58. Área objeto de estudio antes de los tratamientos (bloque A); Área después de implementar los tratamientos para su rehabilitación de cobertura. (bloque B).

Conclusiones

Conclusiones objetivo específico 1.

De acuerdo a los resultados de esta investigación se cumplió con el objetivo 1, ya que se logró determinar que el modelo físico de arquitectura de raíz artificial parabólica con fibras orgánicas de *Furcraea andina* fue el que brindó la mayor estabilidad estructural a muestras de suelos del área degradada. Lo que generó un nuevo conocimiento para implementar en favor de la estabilidad de suelos en diferentes clases texturales, así como las bases para continuar con el desarrollo de investigaciones en la línea de raíces artificiales con fibras orgánicas que pueden fortalecer la bioingeniería de suelos. También se contribuyó con la creación del prototipo vertical el cual permite someter 64 muestras de suelo a esfuerzos mecánicos con un ángulo de giro de 0 – 90°, e involucrar ciclos de humedecimiento y secado, ocupando un área de 1 m² y 3 m de altura. lo que hace, que sea un modelo a seguir para facilitar los estudios a nivel de laboratorio y promover el desarrollo de investigaciones relacionadas con el recurso suelo.

La arquitectura de raíz artificial contribuye de manera significativa a la mitigación del desprendimiento de partículas de las muestras de suelo de clase textural: arcillosa, franco arenoso y franco, teniendo en cuenta que a las muestras testigo, que no se les involucro raíz artificial al someterlas a esfuerzos mecánicos con ciclos de humedecimiento y secado, presentaron pérdidas promedio del 50 % (sedimentos).

Al involucrar la raíz artificial de *Furcraea andina* con la arquitectura triangular y parabólica, se evidencia la reducción de pérdidas de partículas en las muestras de suelo, sin embargo, la que presentó mejor efectividad fue la parabólica, al tener una mayor distribución de fibras por toda la muestra del suelo, mientras que la triangular sacrifica varios hilos al tener una raíz central gruesa, lo que impide ocupar un mayor volumen en la muestra y por ello la cohesión es

menor con las partículas de suelo.

El mucilago de *Aloe vera* no presentó efectos positivos, frente al desprendimiento de partículas de las muestras de suelo al someterla a esfuerzos mecánicos y ciclos de humedecimiento y secado, debido a que cuando este se involucra en la raíz artificial, crea una película en la fibra que limita el proceso de cohesión con el suelo, lo que reduce su efectividad.

Conclusiones objetivo específico 2

Se dio cumplimiento al objetivo 2, realizando un diagnóstico integral de manera hidrofísica, biomecánica y ambiental del área degradada, lo que permitió entender de manera apropiada los fenómenos que ocurrían en la ladera, bajo un protocolo holístico para el levantamiento de información el cual contemplo la flora que prevalece en la zona, el material parental, los impactos ambientales mediante la matriz de causas y efecto, las variables del suelo como el pH, DA, DR, CE, DMP, MO, CIC, IP, Arcilla, arena y limo, uso de la *RUSLE*, y el índice de productividad del suelo, para cada una de las zonas dentro del área objeto de estudio, es así que se mejoró la precisión en la toma de datos y facilitó la toma de decisiones para la rehabilitación de zonas sometidas a procesos de erosión y remoción, bajo una comprensión específica de los fenómenos que sucedían en las diferentes zonas del área de estudio.

Las causas detonadoras de la degradación de la ladera objeto de estudio se debieron al cambio de uso del suelo, con establecimiento de potreros, flora introducida, implementación de ganadería en montaña, construcción de vía nacional y deterioro de las tuberías transportadoras de agua. Los efectos se manifestaron en remoción en masa, erosión, desplazamiento de flora y fauna, pérdida de coberturas, deterioro de la fertilidad del suelo y un impacto paisajístico negativo.

Se presento una alta variabilidad en las variables del del suelo de las zonas de la ladera,

donde las diferencias más significativas se presentaron en los valores de densidad aparente, diámetro medio ponderado, materia orgánica, y contenido de arcilla, los contrastes más marcados se presentaron en la zona de cultivo, alta y baja frente a las zonas de mayor inclinación (media 1, media 2, y media 3). No se presentaron diferencias estadísticamente significativas, en pH, densidad real, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, índice de plasticidad, arena y limo.

La zona de cultivo que no estuvo expuesta a la degradación por los movimientos en masa, fue la que más erosionabilidad registró, debido en gran medida a que esta presentó los mayores contenidos de limo, arena fina y arena muy fina, mientras que la zona media 1 de mayor inclinación y degradación evidente, fue la que menor erosionabilidad presentó, debido a que, al perder el suelo superficial, la capa que afloró fue la arcillosa.

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en las estimaciones de las pérdidas máximas de suelo, antes de implementar los tratamientos de rehabilitación en la zona objeto de estudio, donde la zona de cultivo fue la que presentó las menores pérdidas al no encontrarse expuesta a los procesos de movimiento en masa, seguido de la zona alta y la baja. Mientras que la zona de la parte media 1 evidenció las mayores pérdidas, seguido de la media 2, y la media 3, siendo estas últimas las que registraron mayor valor de LS.

La zona de cultivo presentó el mayor índice de productividad (IP), con un valor de (0,56) frente a las zonas de ladera que presentaban procesos de degradación del suelo con valores de 0,25 para la zona alta y 0,24 para la baja, lo que las ubico en un IP moderado. Mientras que las zonas medias 1 (0,01), media 2 (0,07) y media 3 (0,08) presentaron valores mínimos lo que evidenció un IP bajo.

Conclusiones objetivo específico 3.

Se cumplió con el objetivo 3, por lo que se determinó que la enmienda con mayor potencial para la rehabilitación de la ladera fue el vermicompost, obtenido a partir de los subproductos del café y del estiércol bovino, facilitando el desarrollo de las coberturas verdes en zonas degradadas por la erosión hídrica. así mismo en esta investigación se contribuyó con un nuevo conocimiento al demostrar que la especie *Anacardium excelsum*, puede ser implementada en la reforestación de laderas bajo procesos de degradación del suelo, debido a su rápido desarrollo y alta capacidad de adaptación.

El aprovechamiento de residuos orgánicos como el estiércol bovino y los subproductos del beneficio del café, permitió la obtención de compost y vermicompost, los cuales aportaron a la mitigación de impactos ambientales negativos, al transformar residuos contaminantes de mayor generación, en productos viables como lo son las enmiendas orgánicas, presentando un pH dentro del rango de neutralidad, una densidad aparente para el compost de $0,6 \text{ g/cm}^3$ y para el vermicompost de $0,9 \text{ g/cm}^3$, donde el mayor aporte de estas enmiendas fue en la materia orgánica con el 39 % para el vermicompost y de 33,6 % para el compost, lo cual fue muy importante, teniendo en cuenta que al inicio del estudio los niveles de materia orgánica en los suelos del área de estudio son bajos.

Al analizar la viabilidad de las enmiendas compost y vermicompost en la rehabilitación de la zona alta y baja de la ladera, con tres especies forestales, se determinó, que las dos enmiendas generaban buenas condiciones para el desarrollo en diámetro y altura de las especies frente al tratamiento testigo; sin embargo, las especies que se desarrollaron con compost presentaron un crecimiento menor con diferencias significativas frente al vermicompost. Por lo cual este último fue seleccionado como la enmienda orgánica de mayor efectividad para la rehabilitación de la ladera.

La especie forestal que presentó el mejor desarrollo en crecimiento en diámetro y altura fue *Anacardium excelsum*, la cual resultó ser muy promisorio para la reforestación de la ladera debido a su buena adaptación, rápido crecimiento y resistencia a los insectos patógenos. La especie *Jacaranda caucana*, aunque logró una supervivencia del 100 % con todos los individuos al culminar el estudio, evidenció un desarrollo lento en las condiciones de la ladera, con susceptibilidad en sus primeros estados de crecimiento a los insectos. Por lo cual esta especie también puede incorporarse en las rehabilitaciones de laderas por su adaptación y contribución al embellecimiento paisajístico, aunque su desarrollo no sea rápido. La especie *Cariniana pyriformis*, presentó alta vulnerabilidad al ataque de la hormiga arriera, lo que limitó en gran medida su crecimiento y presentó mortalidad, por lo cual no se recomienda para la rehabilitación de la ladera, ya que para garantizar su desarrollo requiere de cuidados especiales que muchas veces no se pueden brindar por las condiciones de sitio.

Conclusiones objetivo específico 4.

Se dio cumplimiento al objetivo 4 y se dio respuesta a la pregunta de investigación, ya que se determinaron los tratamientos más efectivos para la rehabilitación integral del área degradada en las zonas de mayor pendiente. Por lo cual el presente estudio aporta como nuevo conocimiento, que el manto de *Manicaria saccifera* al 50 % de entrada de luz, cuando se combina con el vermicompost y se ancla a la ladera, facilita una rápida rehabilitación de cobertura con especies herbáceas con un valor cercano al 100 % de cubrimiento, y que al descomponerse se integra de manera biológica al suelo. Otro aporte muy importante del presente estudio es que el manto no convencional de polietileno, presenta un comportamiento similar, con la diferencia que este puede durar varios años para descomponerse por lo cual se recomienda para zonas en que las coberturas verdes presenten lento desarrollo. También se

destaca que la raíz artificial es compatible con los insumos nombrados anteriormente, pero que su efectividad va más dirigida al amarre del suelo que al desarrollo de coberturas verdes.

Tanto el manto de *Manicaria* como el de polietileno presentan la misma efectividad en el desarrollo de la cobertura en las zonas de mayor inclinación de la parte media de la ladera, los cuales son indispensables y no se pueden omitir; ya que las unidades experimentales en las que no fueron implementados los mantos, presentaron los valores más bajos en desarrollo de cobertura, debido que al quedar expuestas a las condiciones directas del entorno, el anclaje de las plantas se veía afectado por la erosión hídrica.

El vermicompost fue un subfactor que resulto indispensable para la rehabilitación de la zona media de la ladera, ya que a partir de esta se generó el mejor desarrollo en cobertura, pero que su efectividad está directamente relacionada con los mantos, puesto que cuando estos no estaban, el desarrollo de la vegetación disminuía de acuerdo a las condiciones del tiempo, ya que al estar descubiertas las unidades experimentales se desprendían partículas de vermicompost, de suelo y la vegetación se desprendía en sus primeros estados.

La gramínea (*Hyparrhenia rufa*) que se incorporó para favorecer el desarrollo de la cobertura en las unidades experimentales, presentó una efectividad similar a la generada por la regeneración natural, la cual era constante cuando se combinaba con los mantos y se implementaba la enmienda.

La raíz artificial permite el anclaje de las raíces naturales de la vegetación en sus primeros estados, gracias a las fibras de *furcraea andina* que se distribuyen desde la superficie del suelo hasta los 40 cm de profundidad y su efectividad se potencializa con la implementación del vermicompost y los mantos.

El mejor desarrollo de la cobertura en las tres zonas obedeció a la combinación de

Arquitectura de raíz (A1) con la regeneración natural (B2), el establecimiento del manto de *Manicaria* (C1) y la aplicación del vermicompost(D1) es decir (A1 - B2 - C1 - D1), destacando que este *manto es* biodegradable y que cuando se desarrolla la regeneración natural, se eliminan costos de implementación y de semilla. Es de resaltar que se puede conseguir una efectividad similar cuando en la combinación anterior se sustituye el subfactor (B2) y se implementa la gramínea (A1 - B2 - C1 - D1). Y como se tiene en cuenta que la efectividad de los mantos fue similar en el estudio se puede implementar las combinaciones anteriores sustituyendo el manto de *Manicaria* C1 por el de polietileno (C2), con la diferencia que este último no es biodegradable (A1 - B2 - C2 - D1) y (A1 - B2 - C1 - D1).

Los subfactores esenciales para el desarrollo de cobertura son los mantos y la enmienda, por lo cual para reducir los costos de implementación y de insumos, es posible omitir la aplicación de la gramínea y de raíz artificial, la diferencia estaría, en que el tiempo de rehabilitación de cobertura sería más prolongado y que la raíz artificial genera beneficios puntuales de estructuración del suelo.

Las condiciones de pendiente y de clase textural del suelo, condicionan en gran medida el desarrollo de la cobertura vegetal en ausencia de la aplicación del vermicompost, razón por la cual cuando no se implementa este último, la vegetación se ve más favorecida en suelos con textura franca a franco- arcillosa que en suelos con predominio de textura arcillosa.

Los factores de cobertura (C) y de Conservación (P), obtenidos con la implementación de los tratamientos en la rehabilitación de la zona objeto de estudio, permitió evidenciar que la aplicación de estos, hace que la estimación de las pérdidas de suelo se reduzca de manera altamente significativa frente a las condiciones iniciales de la zona objeto de estudio, principalmente en las zonas de mayor inclinación que pasaron de $677 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ cuando

estaba expuesta a los procesos de degradación a un promedio de $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ cuando se implementó la rehabilitación de la ladera.

Conclusiones objetivo específico 5.

Se dio cumplimiento efectivo del objetivo 5 con la obtención del peso ecológico de las especies como factor esencial en la rehabilitación ambiental de áreas degradadas, y se contribuyó con nuevos conocimientos para el estudio de las especies de la regeneración natural, desarrollo y distribución en las UE con respecto a su abundancia dominancia y frecuencia.

En las 108 unidades experimentales que no se incorporó la gramínea, se identificó una regeneración natural compuesta por 27 especies con 1105 individuos, de las cuales 25 eran pertenecientes a la flora herbácea y 2 a la flora arbórea.

En la regeneración natural(RN) se encontró relación con dos especies arbóreas del área de influencias de la zona objeto de estudio (*Albizia guachapele* y *Ficus pallida*), mientras que en la flora herbácea la relación se mantuvo con 4 especies (*Bidens pilosa*, *Cenchrus brownii*, *Cynodon nlemfuensis*), es decir que de las 25 especies halladas en la RN se establecieron 21 que no presentaron relación con las inventariadas de manera inicial y que evidenciaron el desarrollo diverso de flora, cuando se generaron condiciones básicas para su reproducción en la zonas de mayor inclinación de la ladera.

Las tres especies con mayor peso ecológico de la regeneración natural lo presentó, *Paspalum notatum*, seguido de *Hyparrhenia rufa* y *Cynodon dactylon*. Por lo cual las más abundantes frecuentes y dominantes fueron en su mayoría las gramíneas, aunque se pudo evidenciar que las otras 22 especies que coexisten entre ellas, aunque su IVI no sea muy alto, presentan un buen desarrollo, con un proceso de colonización más lento pero que contribuyen de manera significativa con la biodiversidad, impacto paisajístico positivo y sostenibilidad de la ladera.

Referencias bibliográficas

- Arrieta, R.M., Valencia, G.Y y Echeverry, R. O (2012). Aplicación de la biomineralización en suelos de Medellín para mitigar procesos erosivos. *Boletín ciencias de la tierra*. 32, 35 -46. file:///C:/Users/danie/Downloads/5-04_38-28-11-11%20Art-Arrieta.pdf
- Ahmed, M. A., Sanaullah, M., Blagodatskaya, E., Jones, K., Jawad, H., Kuzyakov, Y., y Dippold, M. (2018). Soil microorganisms exhibit enzymatic and priming response to root mucilage under drought. *Soil Biology and Biochemistry*. 116(1), 410-418. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.10.041>
- Aristizábal, E. V., Vélez, J. I., y Martínez, H. E. (2016). Influences of antecedent rainfall and hydraulic conductivity on landslides triggered by rainfall occurrence using the model Shia_Landslide. *Revista EIA*, 13 (26), 31–46. <https://doi.org/10.24050/reia.v13i26.863>
- Aronson, J., & Alexander, S. (2013). Ecosystem restoration is now a global priority: time to roll up our sleeves. *Restoration Ecology*. 21(3), 293 - 296. [https://doi.org/10.1608/FRJ-3.1.210.1111 / rec.12011](https://doi.org/10.1608/FRJ-3.1.210.1111/rec.12011)
- Ávila, B. (2010). Transferencia de la técnica de manejo y producción a base de pulpa de café, con pequeños caficultores de la aldea de Los Coles, San Pedro Necta, Huehuetenango. (Tesis de pregrado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala
- Bhattacharyya, R., Fullen, M. A., Davies, K., y Booth, C. A. (2009). Utilizing palm-leaf geotextile mats to conserve loamy sand soil in the United Kingdom. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 130(2), 50–58. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.11.015>
- Bischetti, G.B. (2000). Quantificazione dell'effetto dell'apparato radicale sulla stabilità dei versanti. *Rivista di Ingegneria Agraria*, 2, 70-81.
- Bouwer, H. 1986. Intake rate: Cylinder infiltrometer. En: A. Klute, (Ed.) *Methods of Soil Analysis* ASA Monograph 9. (pp. 825-843) ASA. Madison, WI

- Broda, J., Grzybowska-Pietras, J., Gawłowski, A., Rom, M., Przybyło, S., y Laszczak, R. (2017). Application of Wool Geotextiles for the Protection of Steep Slopes. *Procedia Engineering*, 200, 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.017>
- Brax, M., Kohne, M., y Schaumann, G.L (2019). Potential of NMR relaxometry to unravel the properties of mucilage in several pore sizes. *Geoderma*, 340, 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.01.013>
- Buczko, U., Bens, O., y Hüttl, R.F (2007). Changes in soil water repellency in a pine–beech forest transformation chronosequence: influence of antecedent rainfall and air temperatures. *Ecological Engineering*, 31(3), 154-164. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.03.006>
- Caicedo, L. y Ardila, P. (2017). Beneficios de los mantos de control de erosión temporal para la recuperación y protección de taludes, (Tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia.
- Camacho, S., y Ramos, M. (2016). Indicador potencial de falla para laderas condicionado por las geoformas. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 40, 39-45. <https://doi.org/10.15446/rbct.n40.53658>
- Carminati, A., Zarebanadkouki, M., Kroener, E., Ahmed, M.A., y Holz, M. (2016). Biophysical rhizosphere processes affecting root water uptake. *Ann Bot*, 118(4), 561–571. <https://doi.org/10.1093/aob/mcw113>
- Capilleri, P., Motta, E., & Raciti, E. (2016). Study on Native Plant Root Tensile Strength for Slope Stabilization. *Procedia Engineering*, 158, 116-121. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.415>
- Chávez, C., Espinosa, J. J., Alarcón, J y Arreygue, J.E (2016). Colapso por humedecimiento en

los terraplenes de la autopista Páztcuaro-Uruapan, Ingeniería Investigación y tecnología, 17(2), 201-210

Chokboribal, J., Tachaboonyakiat, W., Sangvanich, P., Ruangpornvisuti, V.,

Jettanacheawchankit, S y Thunyakitpisal, P., (2015). Deacetylation affects the physical properties and bioactivity of acemannan, an extracted polysaccharide from *Aloe vera*. Carbohydrate Polymers 133, 556-566.

Clapp, J.P., Helgason, T., Daniell, T.J., Peter, J., y Young, W. (2003) Genetic studies of the structure and diversity of arbuscular mycorrhizal fungal communities. En: van der Heijden M.G. A., Sanders I.R (Eds) Mycorrhizal Ecology. Ecological studies (Analysis and synthesis) 157, 201-224. Springer, Heidelberg, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-540-38364-2_8

Chok, Y.H., Jaksa, M.B., Kaggwa, W.S., y Griffiths, D.V (2015) Assessing the influence of root reinforcement on slope stability by finite elements. International Journal of Geo-Engineering, 6-12. <https://doi.org/10.1186/s40703-015-0012-5>

Congreso de la República de Colombia (2019). Ley No 1955 del 25 de mayo de 2019 por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018 – 2022, “Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad”. Bogotá D.C. Congreso de la República de Colombia.

Compañía Nacional de Chocolates S. A. S. (CNCh) (2021). modelo productivo para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) sistemas agroforestales sostenibles. Grupo Empresarial Nutresa. Medellín. Colombia

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (2006). *Experiencias y resultados en el Territorio CAR*. Ltda.

<http://sie.car.gov.co/bitstream/handle/20.500.11786/33921/14620.pdf?sequence=1&isAll>

owed=y

Curtis, J. y McIntosh, R. (1951). An upland forest continuum in the prairie-forest border region of Wisconsin. *Ecology* 32, 476-496.

Dávila, M., y Ramírez C. (1996). Lombricultura en pulpa de café. *Avances técnicos*, 225. Centro Nacional de Investigaciones de Café (Cenicafe).

Day, R.P. (1965a). Hydrometer method of particle size analysis. En Black, C.A., (Ed) *Methods of soil analysis*. 545 -552. *Agronomy 9*. American Society of Agronomy, Madison, USA.

Delgado, F., y Lopez, R., 1998. Evaluation of soil Development Impact on the Productivity of Venezuelan Soils. *Adv. Geo. Ecol.* 31, 133-142.

Delgado, F., Vasquez, L. 1997. MIPACS. Modelo Índice de Productividad con aplicación a la conservación de suelos. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Mérida-Venezuela. 14 p.

Dissmeyer, G. E., y Foster, G. R., 1983: Modifying the universal soil loss equation for forest land. En: *Soil Erosion and Conservation*. S. A. El-Swaify, W. C. Moldenhauer y A. Lo (eds.): pp 480-495. Soil Conservation Society of America. Ankeny. Iowa

Dellavedova, M.G (2016). Guía metodológica para la elaboración de una evaluación de impacto ambiental. [Taller vertical Yantorno].

<https://blogs.ead.unlp.edu.ar/planeamientofau/files/2013/05/Ficha-N%C2%BA-17-Gu%C3%ADa-metodol%C3%B3gica-para-la-elaboraci%C3%B3n-de-una-EIA.pdf>

Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) y Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA), (2016). Plan Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación del Sector Agropecuario Colombiano (PEPTIA), 2017-2027.

[https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12759/109429_67478.pdf?sequence=1 &isAllowed=y](https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/12759/109429_67478.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

De Souza, S. F., Cherian, B. M., Leão, A. L., Kozłowski, R. M., & Thomas, S. (2020). Natural fibres for geotextiles. *Handbook of Natural Fibers*, 499–530. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818782-1.00015-8>

Falla, P.A y Suarez, Y.A (2023). Evaluación de la efectividad del compost y vermicompost en combinación con las especies forestales (*Jacaranda caucana*, *Anacardium excelsum* y *Cariniana pyriformis*) como técnica para la rehabilitación de áreas degradadas. [Tesis de pregrado]. Universidad Surcolombiana. Colombia.

Flórez, A. (1986). Geomorfología del área Manizales – Chinchiná, Cordillera Central, Colombia (Tesis de Doctorado). Universidad van Amsterdam.

Flórez, F.G. (2014). Efectividad de la bioingeniería para el tratamiento de la erosión y los movimientos en masa en laderas. [Tesis de Maestría] Universidad de Manizales, Caldas - Colombia.

Fiore, V. Scalici, T y Valenza A. (2014), Characterization of a new natural fiber from *Arundo donax* L.as potential reinforcement of polymer composites. *Carbohydr Polym.* 106, 78-83. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2014.02.016>

Forsythe, W. (1985). Física de Suelos. Manual de Laboratorio. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). San José Costa Rica. Disponible en: <http://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/7841/BVE19040149e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Gabriels, D., y Lobo, D. (2006) Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, 14(1), 37-48.

http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/982

Gabriels, D., Lobo, D., y Pulido, M. (2006). Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. *Venezuelos*, 14(1), 7 – 22.

http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/980

Gadi, V. K., Garg, A., Kobayashi, & Sahoo, L. (2016). Improving and correcting unsaturated soil hydraulic properties with plant parameters for agriculture and bioengineered slopes.

Rhizosphere, 1, 58–78. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2016.07.003>

Genet, M., Stokes, A., Salin, F., Mickovski, S.B., Fourcaud, T., Dumail, J.F y Van Beek, R.

(2005). The influence of cellulose content on tensile strength in tree roots. *Plant and Soil*, 278(1-2), 1-9. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-8768-6>

George, B.R., Bockarie, A., McBride, H., Hoppy, D y Scutti, A. (2003). Utilization of turkey feather fibers in nonwoven erosion control fabrics. *International Nonwovens Journal*, 12 (2), 1 - 8. <https://doi.org/10.1177/1558925003os-1200212>

Gee, G. W. y Bauder, J. W. (1986). Particle Size Analysis. *Methods of Soil Analysis, Part 1.*

Physical and Mineralogical Methods, Agronomy Monograph No. 9, 2nd Edition, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison, WI, 383-411.

Giupponi, L. Bischetti, G.B., y Giorgi, A. (2017). A proposal for assessing the success of soil bioengineering work by analysing vegetation: results of two case studies in the Italian Alps. *Landscape and Ecological Engineering*, 13(2), 305–318. <https://doi.org/10.1007/s11355-016-0323-5>

Gómez, A. y Rivera, J. H. (1993). La conservación de los suelos y la sostenibilidad de la productividad en la zona cafetera. *Avances Técnicos Cenicafé*. No. 190. Colombia.

González, M (1991). La ecuación Universal de Pérdidas de Suelo: la ecuación universal de

pérdidas de suelo. Pasado, presente y futuro. *Ecología*. 5, 13-50.

https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia_05_02_tcm30-100846.pdf

Gómez, A.A., Alarcón H., (1975). *Manual de conservación de suelos de ladera*. Federación de cafeteros, Centro nacional de Investigaciones de café (CENICAFE).

Guo, Y., Xu, T., Cheng J, Wei, G., Lin, Y (2021). Above- and belowground biodiversity drives soil multifunctionality along a long-term grassland restoration chronosequence. *Science of The Total Environment*. 772(1), 145010, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145010>

Hernández, D. (2021) *Geomalla híbrida, una solución a taludes conformados por suelos expansivos*. [Tesis de Maestría], Universidad Autónoma de Querétaro. <http://ring.uaq.mx/handle/123456789/2457>

Hoyos, F. y Mejía, M. (1999). Las raíces de la estabilidad. *Boletín de Vías*. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, 26 (92), 46-66.

Hubble, T., Clarke, S., Stokes A., & Phillips, C. (2017). 4th International Conference on soil bio- and eco-engineering (SBEE2016) ‘The Use of Vegetation to Improve Slope Stability’. *Ecological Engineering*, 109(Part B), 141-144. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.11.003>

Hudson, N.W (1963). Raindrop size distribution in high intensity storm. *Rhodesian Journal of Agricultural*. 1, 6-11.

Icontec (2014). *Calidad de suelo. Determinación de la capacidad de intercambio catiónico*. (Norma Técnica Colombiana 5268). <https://docplayer.es/79801387-Norma-tecnica-colombiana-5268.html>

Icontec (2008). *Calidad de suelo. Determinación de la conductividad eléctrica*. (Norma Técnica

- Colombiana 5596). <https://docplayer.es/91099334-Norma-tecnica-colombiana-5596.html>
- Icontec (2008). Calidad de suelo. Determinación del pH. (Norma Técnica Colombiana 5264). <https://docplayer.es/57197445-Norma-tecnica-colombiana-5264.html>
- Icontec (2006). Calidad de suelo. Determinación del carbono orgánico. (Norma Técnica Colombiana 5403). https://kupdf.net/download/ntc-5403-determinacion-de-materia-organica_5eb78a55e2b6f5bc270a4cca_pdf
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC (2006). Métodos de análisis de laboratorio. 6ta edición.
- Jiménez, C.A. (2017). Análisis de metodologías para la inclusión de parámetros hidrológicos en la estabilidad de taludes. Universidad Nacional. Bogotá, Colombia.
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., y Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia*, 24(1), 49-61. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Krogstad, F. (1995). A physiology and ecology-based model of lateral root reinforcement of unstable hillslopes (Master of Science thesis). University of Washington. Washington.
- Ledezma, E. (2011). Etnobotánica de las Palmas en las tierras bajas del Pacífico Colombiano con énfasis en la palma cabecinegro (*Manicaria saccifera Gaertn*). Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7613>
- Lekha, K. y Kavitha, V. (2006). Coir geotextile reinforced clay dykes for drainage of low-lying areas. *Geotextiles and Geomembranes*, 24 (1), 38–51. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2005.05.001>
- Leopold, L. B., Clarke, F. E., Hanshaw, B. B., y Balsley, J. R. (1971). A Procedure for Evaluating Environmental Impact. Geological Survey Circular, 645, Washington DC, 1971.

- Liu, H., y Feng, S. (2016). Analytical analysis of hydraulic effect of vegetation on shallow slope stability with different root architectures. *Computers and Geotechnics*, 80, 115–120.
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.06.006>
- Liu, J., Shi, B., Jiang, H., Huang H., Wang G., y Kamai. (2011). Research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer. *Engineering Geology*. 117(1-2), 114 - 120. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.011>
- Julca-Otiniano, A., Meneses-Florián, L., Blas-Sevillano, R., y Bello-Amez, S. (2006). La materia orgánica, importancia y experiencia de su uso en la agricultura. *Idesia*, 24(1), 49-61.
<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292006000100009>
- Lobo, D y Pulido, M. (2006). Métodos e índices para evaluar la estabilidad estructural de los suelos. *Venesuelos*, 14(1), 22 -37.
http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/981
- Lozano, Z., Lobo, D., y Pla, S. (2000). Diagnóstico de limitaciones físicas en inceptisoles de los Llanos Occidentales Venezolanos. *Bioagro* 12(1): 15-24.
<https://www.redalyc.org/pdf/857/85712103.pdf>
- Lozano, Z. (2006), Muestreo con fines de caracterización y evaluación de propiedades de los suelos. *Venesuelos*, 14(1), 70-79.
http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/984
- Maji, J.F y Duran Y. D (2022). Evaluación del suelo en diferentes posiciones del paisaje de una ladera afectada por procesos de remoción en masa del municipio de La Plata Huila. [Tesis de pregrado]. Universidad Surcolombiana. Colombia.
- Mannering, J. V. (1981). The use of soil loss tolerance as a strategy for soil conservation. En: *Problems and Conservation*. Morgan, R.P ed. John Wiley. pp 337 – 349.

- Melo, O. y Vargas R. (2003). Evaluación de la Diversidad Biológica Ecológica. In Omar Aurelio Melo (Ed.), Evaluación Ecológica y Silvicultural de Ecosistemas Boscosos. Universidad del Tolima. https://issuu.com/johnnydelva/docs/evaluacion_ecologica_silvicultural
- Michiels, P. y D. Gabriels (1996). Rain variability indices for the assessment of rainfall erosivity in the Mediterranean region. En Rubio, J. I. and A. Calvo (eds.), Soil degradation in Mediterranean environments, Geofoma Ediciones, Logroño, pp. 49-70.
- Minjares J., Femenia, A., 2016. Effect of Processing on the Bioactive Polysaccharides and Phenolic Compounds from Aloe vera (*Aloe barbadensis Miller*): In Farah Hosseinian, B. Dave Oomach, Rocio Campos Vega (Ed.) Dietary Fiber Functionality In Food and Nutraceuticals, From Plant to Gut, pp. 263-287.
- Miranda, R. (2016). Revisión panorámica del uso del pasto vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) en restauración de taludes como técnica de bioingeniería del suelo. [Tesis de Maestría]. Fundación Universidad de Bogotá. Colombia
- Navdeep, K y Dipayan, D (2018). Nonwoven geotextiles from nettle and poly(lactic acid) fibers for slope stabilization using bioengineering approach. Geotextiles and Geomembranes. 46(1), 216-219. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2017.11.007>
- Narváez M, C., Aguirre N, y Maldonado M. (2017). Efecto de la introducción de especies forestales en suelos degradados en procesos de restauración ecológica en el sur del Ecuador. Bosques Latitud Cero, 7(2), 22-38. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/319/291>
- Ng, C., Woon K., Leung A., y Chu, L. (2013). Experimental investigation of induced suction distribution in a grass-covered soil. Ecological Engineering, 52, 219 – 223. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.11.013>
- Norris, J.E & Greenwood, J.R. (2006) Assessing the role of vegetation on soil slopes in urban areas. The Geological Society of London, 744.

- O'Loughlin, C. L. y Ziemer, R. R. (1982). The importance of root strength and deterioration rates upon edaphic stability in steep-land forest. In: Carbon Uptake and Allocation in Subalpine Ecosystems as a Key to Management, Oregon State Univ., Corvallis, (Proc. IUFRO Workshop, August 1982)
- Páez, M. L. (1994). Clasificación de los suelos por riesgos de erosión hídrica con fines de planificación agrícola. *Revista de la Facultad de Agronomía. UCV. Maracay.* 20:(1- 2):83 - 100.
- Pierce, F.J., Larson, W.E., Dowdy, R.H., Graham, W.A.P. (1983). Productivity of soils: assessing long term changes due to erosion's long-term effects. *J. Soil Water Conserv.* 38, 39-44.
- Pinchao, A., Osorio, O., Checa, O., y Tobar, E. (2019). Estudio sobre la velocidad y tiempo de biodegradación bajo condiciones controladas de fibras naturales de fique (*Furcraea andina*) y Algodón (*Gossypium barbadense*). *Revista Información Tecnológica*, 30(4), 59-68. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642019000400059>
- Pla S., I. (1983). Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Revista de la Facultad de Agronomía.* Alcance N° 32. Universidad Central de Venezuela. 91p.
- Poesen, J. (1986). Surface sealing on loose sediments: the role of texture, slope and position of stones in the top layer. In: Callebaut F. D. Gabriels, and M. De Boodt (eds). *Assessment of Soil Surface Sealing and Crusting. Proc. of Symposium, Gent, Belgium.* pp: 354-362.
- Porras, A., Marañón A y Aschcroft (2015). Characterization of a novel natural cellulose fabric from *Manicaria saccifera* palm as possible reinforcement of composite materials. *Composites Part B: Engineering*, 74, 66-73.

- Pulido, M., Lobo, D., y Lozano, Z. (2009). Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencia*, 43(3),221-230.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30211225001>
- Pulido, M., Gabriels., D., Lobo, D., Rey, J., & Cornelis, W. (2014). Visual field assessment of soil structural quality in tropical soils. *Soil and Tillage Research*, 139(1), 8–18.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.002>
- Quiroga, J.L. (2014). Incidencia de la adición de fibras metálicas y poliméricas sobre el proceso corrosivo del acero en el concreto reforzado con la inclusión de aditivos. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- Ramírez O., F.A., Hincapié G., E., Sadeghian Kh., S., Pérez G., U. (2007) Erosividad de las lluvias en la zona cafetera central y occidental del departamento de Caldas. *Cenicafé* 58(1):40-52.
- Ramírez, F.A., Hincapié E., Sadeghian, S. (2009). Erodabilidad de los suelos de la zona central cafetera del departamento de Caldas. *Cenicafé*, 60(1) 58-71.
- Ranganathan, SR (1994). Development and Potential of Jute Geotextiles. *Geotextiles and Geomembrane*. 13 (6-7), 421–433. [https://doi.org/10.1016/0266-1144\(94\)90006-x](https://doi.org/10.1016/0266-1144(94)90006-x)
- Renard, K. G. (1997). Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). United States Government Printing
- Rey F., Bifulco C., Bischetti G., Bourrier F., De Cesare D., Florineth F., Graf F., Marden, M., Mickovski S., Phillips C., Peklo K., Poesen J., Polster D., Preti F., Rauch H., Raymond P., Sangalli P., Tardio G., & Stokes A. (2019). Soil and water bioengineering: Practice and research needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration. *Science of The Total Environment* 648(1), 1210-1218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.217>

Rillig, M.C., y Mummey, D. L (2006). Mycorrhizas and soil structure. *New Phytol*, 171(1), 41-53. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01750.x>

Rivera, J.H. (2018). Restauración de suelos degradados por erosión en cárcavas remontantes en laderas tropicales de Dagua Valle Colombia. En A. Torrente. (Ed.), *Gestión de suelo para una agricultura sana, productiva y sostenible* (107-120). Neiva, Colombia: Universidad Surcolombiana

Rivera, J.H. (2017). Casos exitosos de recuperación de suelos en sistemas productivos de Colombia. En A. Torrente (Coordinador), *Los suelos y el post conflicto*, llevado a cabo en el 3^{er} Seminario Nacional manejo sostenible y productivo del suelo, Neiva, Colombia.

Rivera, J.H., Sánchez F., Osorio, A., y Francio L, E. (2015). *Manual de procedimientos para el manejo de procesos denudativos con obras de bioingeniería*. Universidad de Caldas – Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.

Rivera, J.H. (octubre 2013). Experiencias de casos exitosos, con el uso de la bioingeniería en el control de problemas de erosión y movimientos masales. Ponencia del VI Seminario de Gestión Ambiental internacional. Seminario llevado a cabo en Medellín. <https://docplayer.es/17959045-Experiencias-de-casos-exitosos-con-el-uso-de-la-bioingenieria-en-el-control-de-problemas-de-erosion-y-movimientos-masales-jose-horacio-rivera-posada.html>

Rivera, J.H., Sánchez, F., Osorio, A. y Franco, L. (2013), *manual de procedimientos para el manejo de procesos denudativos con obras de Bioingeniería*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR).

https://www.academia.edu/36179484/Manual_de_procedimientos_para_el_manejo_de_procesos_denudativos_con_obras_de_Bioingenier%C3%ADa

- Rivera, J.H. 2011. Sistemas de drenaje con filtros vivos para la estabilización y restauración demovimientos masales en zonas de ladera. Avances Técnicos Cenicafé. No. 413. Colombia.
- Rivera, J.H. (2009). Uso, Manejo y Conservación Integral del Suelo para un Desarrollo Sostenible. Universidad de Manizales. Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo.
- Rivera, J.H. (2001). Manejo y estabilización de taludes en zonas de ladera mediante tratamientos de bioingeniería. Avances Técnicos Cenicafé. No. 291. Colombia.
- Rivera, J.H. (2002). Construcción de trinchos vivos para conducción de aguas de escorrentía en zonastropicales de ladera. Avances Técnicos Cenicafé. No. 296. Colombia.
- Rivera, J.H, Sinisterra, R. J., Calle, D. Z. (2007). Restauración Ecológica de suelos degradados por Erosión en Cárcavas en el enclave xerofítico de Dagua, Valle del Cauca, Colombia. Producción agropecuaria. <https://cipav.org.co/wp-content/uploads/2019/06/RESTAURACION-CARCAVA-Dagua.pdf>
- Rivera, J.H. (1999). Control de derrumbes y negativos en carreteras, mediante tratamientos de tipo biológico. Avances Técnicos Cenicafé No. 264. Colombia.
- Rivera, J.H, (1999). El manejo integrado de arvenses en cafetales aumenta los ingresos y evita la erosión. Avances Técnicos Cenicafé No. 259. Colombia.
- Rivera, J.H. (1998). Control de cárcavas remontantes en zonas de ladera mediante tratamientos biológicos. Avances Técnicos Cenicafé. No. 256. Colombia.
- Rivera, J.H. (1997). Arvenses y su interferencia en el cultivo del café. Avances Técnicos Cenicafé. No. 233. Colombia.
- Rivera, J.H. (1996). Por qué no se debe usar el azadón como herramienta de desyerba en sus

cafetales. Avances Técnicos Cenicafé. No. 237. Colombia.

Rivera J.H., Amariz, M., Rincón, W (1986). Plan de uso, manejo y conservación de los suelos del Centro Experimental Cotové. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, 313 p

Rodríguez, D. (2017). Desarrollo de un método sistémico para la rehabilitación ecológica de sueloserosionados de ladera en el municipio de La Plata, departamento del Huila. [Tesis de Maestría]. Universidad Surcolombiana, Colombia.

Rubilar B, K. (2017) influencia del porcentaje de sombra de malla raschel en biomantos de paja de trigo para recubrimientos de taludes. [Tesis de Pregrado], Universidad BIO-BIO, de Chile.

Salas, P.M., Fernández N, E., Quintana V, G., y Aguilar, M. (2017). Efecto de la inclinación y pedregosidad sobre el reparto del agua de lluvia, su cuantificación y aplicación al estudio de la vegetación en zonas áridas. *Investigaciones Geográficas*. 92(1), 1-13.

<https://doi.org/10.14350/rig.55204>

Sánchez, F.J., y Osorio, A (2018). Bioingeniería de Suelo y restauración ecológica. En A. Torrente. (Ed.), *Gestión de suelo para una agricultura sana, productiva y sostenible* (107-120). Neiva, Colombia:Universidad Surcolombiana

Scanlan, C.A., & Hinz, C. (August 2010). Insights into the processes and effects of root-induced changes to soil hydraulic properties. In: *Proceedings of the 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World*, Brisbane, Australia. Edited by R. Gilkes and N. Prakongkep, 1, 924- 927.

Schwartz, N., Carminati, A., & Javaux, M., (2016). The impact of mucilage on root water uptake—a numerical study. *Water Resour*, 52, 264–277.

<https://doi.org/10.1002/2015WR018150>

- Shaxson F. y Barber R. (2005). Optimización de la humedad del suelo para la producción vegetal. El significado de la porosidad del suelo. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Boletín de suelos de la FAO No 79. FAO. Roma.
- Silva O. (1995). Ecuaciones para evaluar, estimar y predecir la erosión hídrica. *Venezuelos*, 3(1), 7-13.
- Sinha, R., Bharambe G. Y Chowdhary U. (2008). Sewage treatment by vermi-filtration with synchronous treatment of sludge by earthworms: a low- cost sustainable technology over conventional systems with potential for decentralization. *Environmentalist*, 28, 409-420.
- Smith, S.E., Jakobsen, I., Gronlund, M., y Smith F. A. (2011). Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. *Plant Physiol*, 156, 1050 - 1057.
<https://doi.org/10.1104/pp.111.174581>
- Soliveres, S y García, P. (2019). Sucesión secundaria, interacciones biológicas y funcionamiento de las comunidades asociadas a taludes de carretera: las interacciones planta-suelo importan más que las planta-planta. *Ecología y Medio Ambiente*. 28(2), 50-60.
<https://doi.org/10.7818/ecos.1718>
- Tang, W., Mohseni, E., y Wang Z. (2018) Development of vegetation concrete technology for slope protection and greening. *Construction and Building Materials*, 179, 605-613.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.207>
- Torres, G. y Silva, X. (2006). Evaluación del efecto que tienen los EM (microorganismos eficientes) en las micorrizas para la recuperación de suelos intervenidos del área de Mondoñedo (Tesis de Pregrado). Universidad de la Salle, Colombia.

- Tortosa, G. (2011). Elaboración a escala pre-industrial de enmiendas y abonos orgánicos sólidos y líquidos mediante compostaje de orujo de oliva de dos fases o “alperujo” (Tesis Doctoral). Universidadde Murcia, España.
- Vázquez, J y Loli, O (2018). compost y vermicompost como enmiendas en la recuperación de un suelo degradado por el manejo de *gypsophila paniculata*. *Scientia Agropecuaria*. 9(1), 43-52. <https://doi.org/10.17268/Sci.Agropecu.2018.01.05>
- Valencia, Y. G. (2009). Influência da biomineralização nas propriedades físico - mecânicas de um perfil de solo tropical afetado por processos erosivos. Tese de Doutorado em Geotecnia, Publicação G.TD-059/09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 183p.
- Waldron, L. J. (1977). The shear resistance of root – permeated homogeneous and stratified soil. *Soil Science Society of American Journal*. 4, 843-849.
- Wischmeier, W.H. (1978). Use and misuse of the Universal Soil Loss Equation. *Soil and Water Conser*. 31, 5-9.
- Wischmeier, W.H., & Smith, D. D. (1962). Soil loss estimation as a tool in soil and water management planning. *Int. AJJoc. Se/enl. Hydrol*. 59, 148-159.
- Wischmeier, W. H. y Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses. *Agricultural Handbook 537*. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture
- Yoder, R.E. (1936). A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical natureof erosion losses. *Agronomy Journal*, 28(5), 337-351.
<https://doi.org/10.2134/agronj1936.00021962002800050001x>
- Zakikhani, P., Zahari, R., Sultan, M. T., y Majid, D. L. (2014). Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites. *Materials & Design*, 63, 820 -828.

<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.058>

Zhang, Z., Cao, L., Zhu, Z., El, C., Xiang, H., Xu, L., Sun, C., Lin, C., Yang, H., y Li, K.

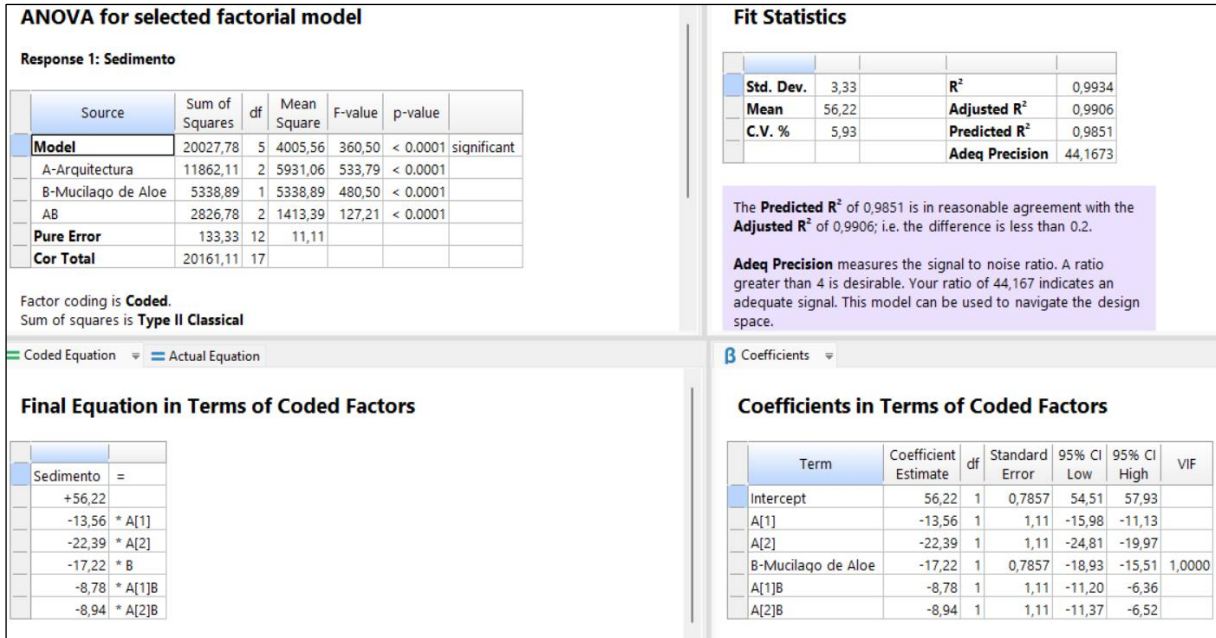
(2019). Evaluation on soil bioengineering measures in agricultural areas: Poorer durability of wooden structures and better aboveground habitat improvements. *Ecological Engineering*. 129, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.01.004>

Zhu, H., Zhang, L., Xiao, T., y Li, X. (2017). Enhancement of slope stability by vegetation considering uncertainties in root distribution. *Computers and Geotechnics*. 85, 84-89.

<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2016.12.027>

Anexos

Anexo 1. Cálculos estadísticos relacionados con arquitectura de raíz artificial y la clase textural arcillosa en la producción de sedimentos.



Fit Statistics

Std. Dev.	3,33	R ²	0,9934
Mean	56,22	Adjusted R ²	0,9906
C.V. %	5,93	Predicted R ²	0,9851
		Adeq Precision	44,1673

The **Predicted R²** of 0,9851 is in reasonable agreement with the **Adjusted R²** of 0,9906; i.e. the difference is less than 0.2.

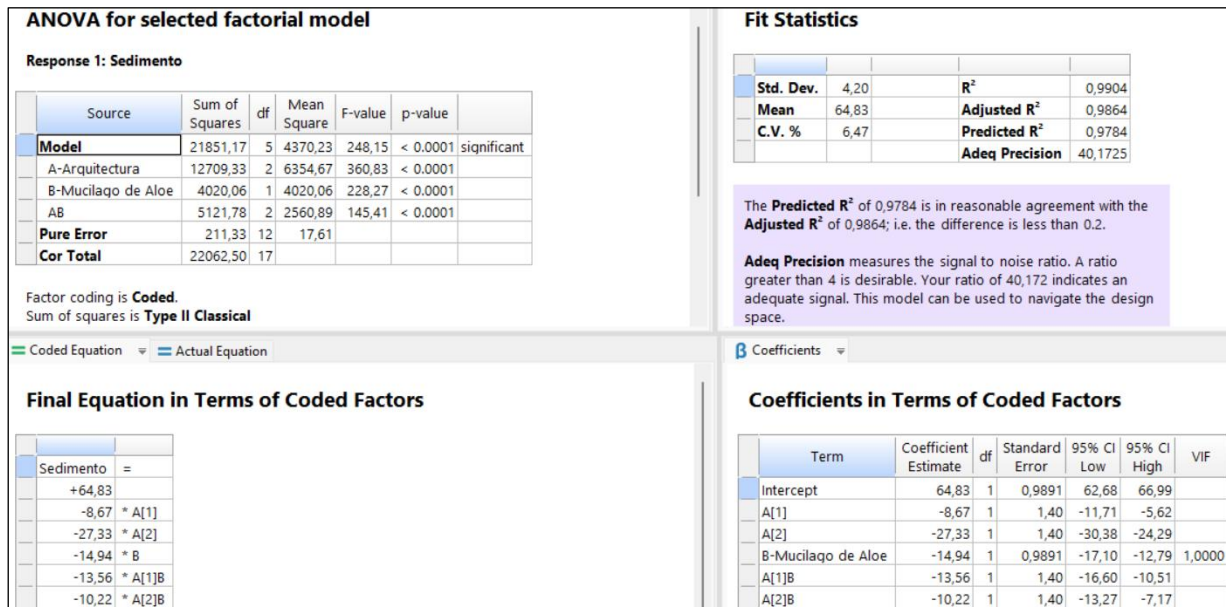
Adeq Precision measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 44,167 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Coefficients

Coefficients in Terms of Coded Factors

Term	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	56,22	1	0,7857	54,51	57,93	
A[1]	-13,56	1	1,11	-15,98	-11,13	
A[2]	-22,39	1	1,11	-24,81	-19,97	
B-Mucilago de Aloe	-17,22	1	0,7857	-18,93	-15,51	1,0000
A[1]B	-8,78	1	1,11	-11,20	-6,36	
A[2]B	-8,94	1	1,11	-11,37	-6,52	

Anexo 2. Cálculos estadísticos relacionados con arquitectura de raíz artificial y la clase textural franco arenosa en la producción de sedimentos.



Fit Statistics

Std. Dev.	4,20	R ²	0,9904
Mean	64,83	Adjusted R ²	0,9864
C.V. %	6,47	Predicted R ²	0,9784
		Adeq Precision	40,1725

The **Predicted R²** of 0,9784 is in reasonable agreement with the **Adjusted R²** of 0,9864; i.e. the difference is less than 0.2.

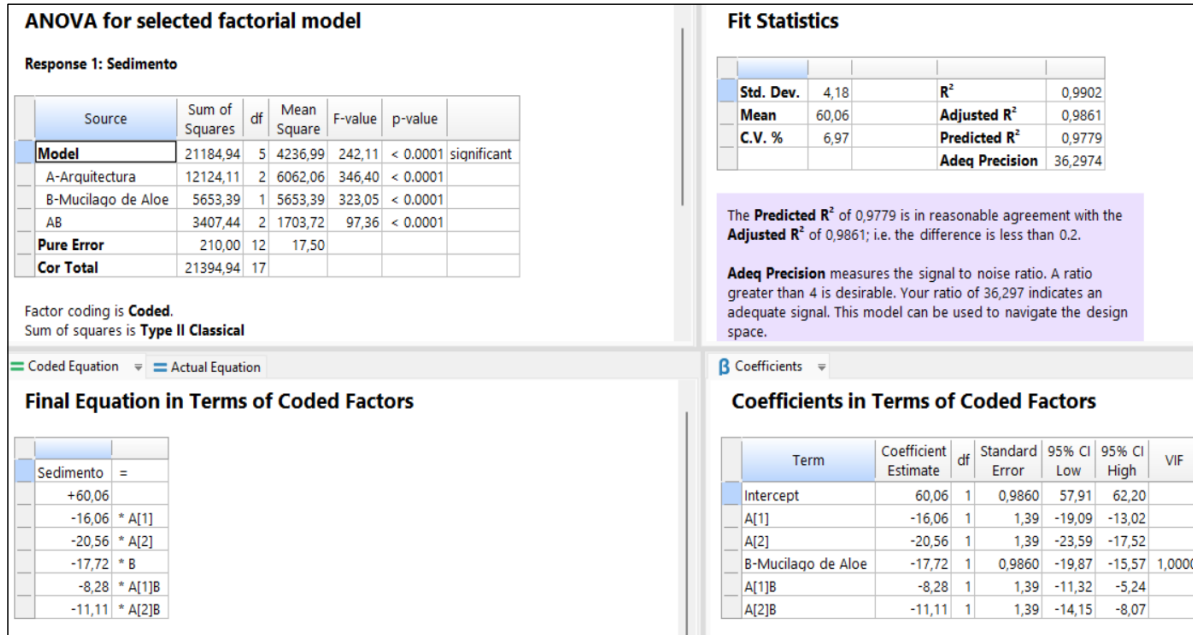
Adeq Precision measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 40,172 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.

Coefficients

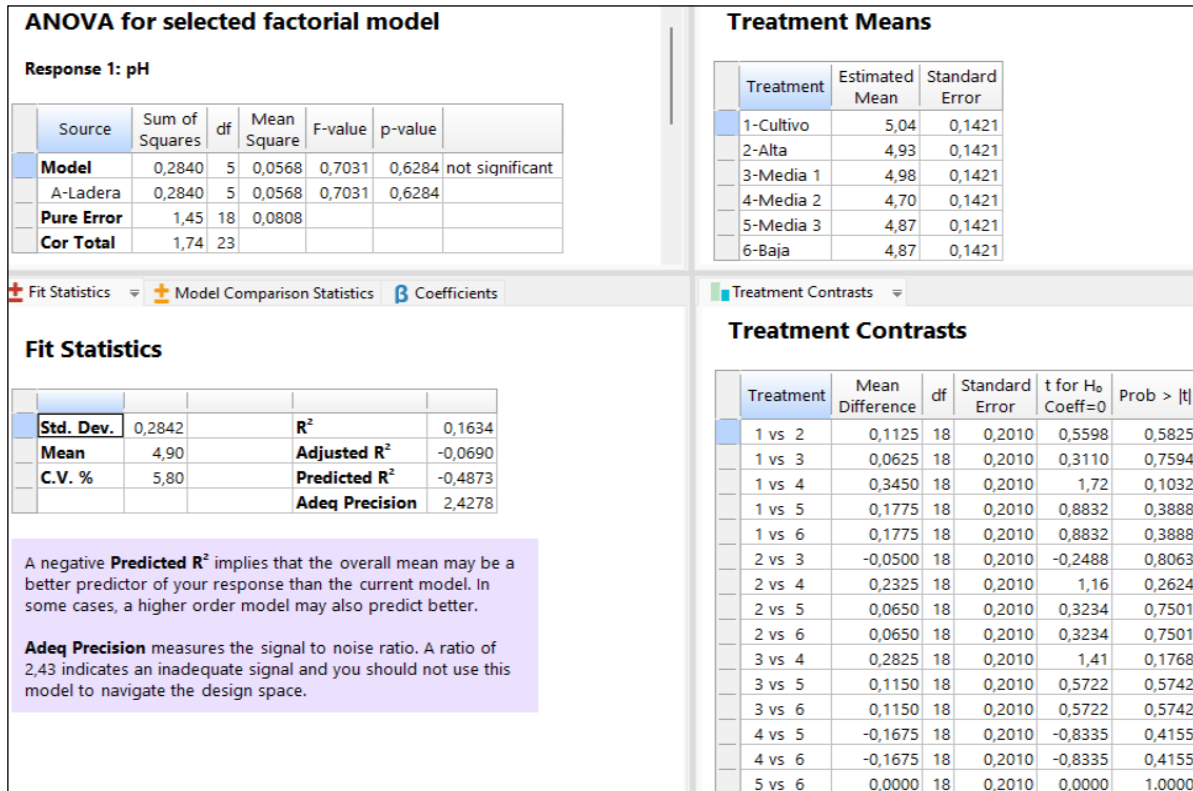
Coefficients in Terms of Coded Factors

Term	Coefficient Estimate	df	Standard Error	95% CI Low	95% CI High	VIF
Intercept	64,83	1	0,9891	62,68	66,99	
A[1]	-8,67	1	1,40	-11,71	-5,62	
A[2]	-27,33	1	1,40	-30,38	-24,29	
B-Mucilago de Aloe	-14,94	1	0,9891	-17,10	-12,79	1,0000
A[1]B	-13,56	1	1,40	-16,60	-10,51	
A[2]B	-10,22	1	1,40	-13,27	-7,17	

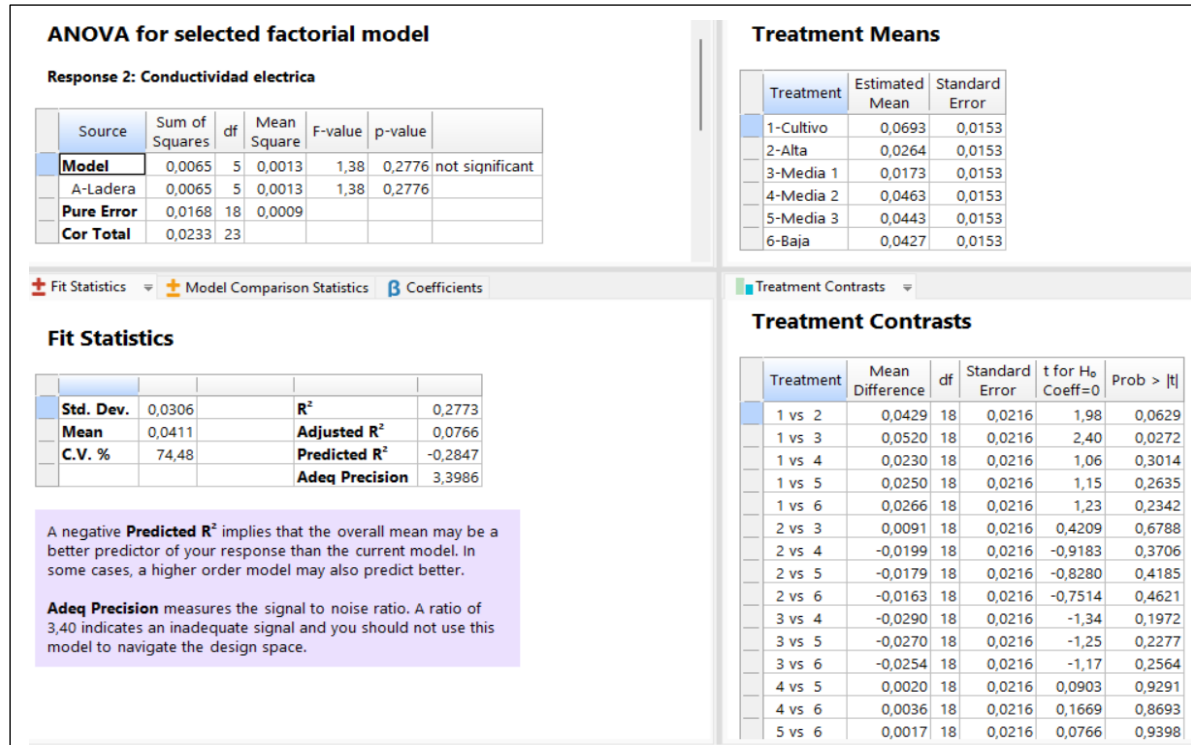
Anexo 3. Cálculos estadísticos relacionados con arquitectura de raíz artificial y la clase textural Franco en la producción de sedimentos.



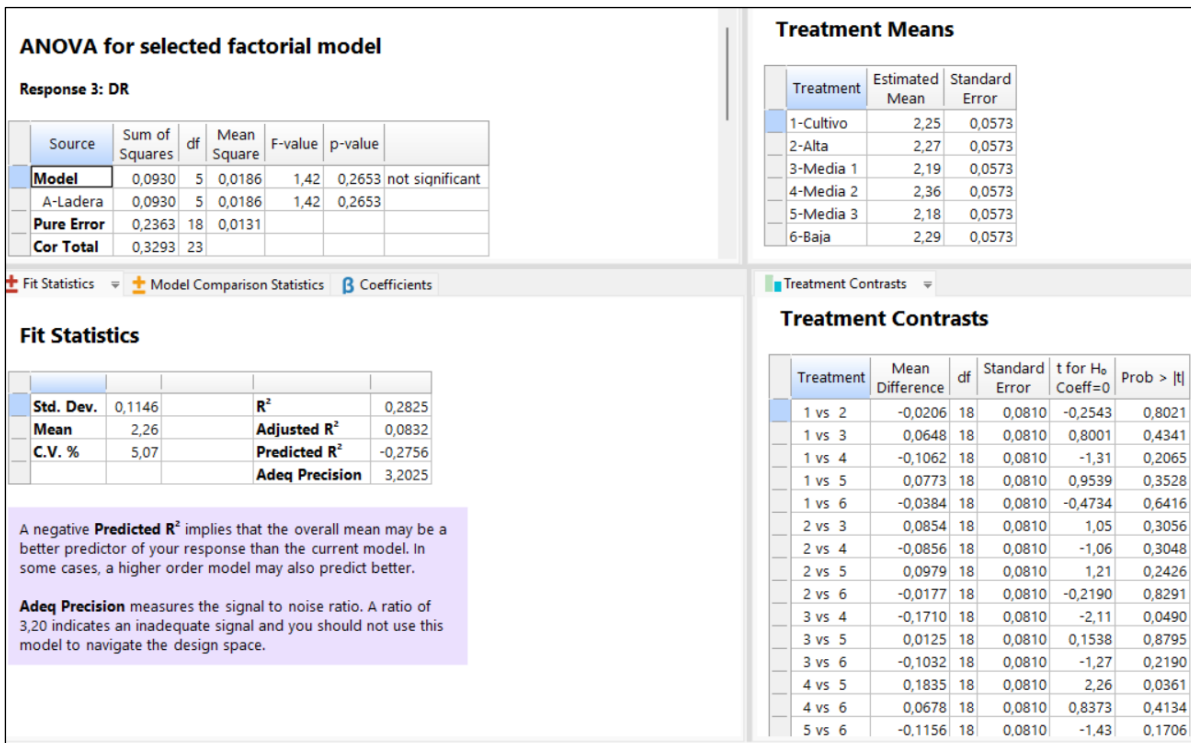
Anexo 4. Estadística relacionada con el pH en cada una de las zonas de la ladera.



Anexo 5. Estadística de la conductividad eléctrica en cada una de las zonas de la ladera.



Anexo 6. Estadística de la Densidad real en cada una de las zonas de la ladera.



Anexo 7. Estadística de la Densidad aparente en cada una de las zonas de la ladera.

ANOVA for selected factorial model							Treatment Means		
Response 4: DA									
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value		Treatment	Estimated Mean	Standard Error
Model	0,4935	5	0,0987	9,62	0,0001	significant	1-Cultivo	1,15	0,0506
A-Ladera	0,4935	5	0,0987	9,62	0,0001		2-Alta	1,16	0,0506
Pure Error	0,1846	18	0,0103				3-Media 1	1,48	0,0506
Cor Total	0,6782	23					4-Media 2	1,47	0,0506
							5-Media 3	1,46	0,0506
							6-Baja	1,37	0,0506

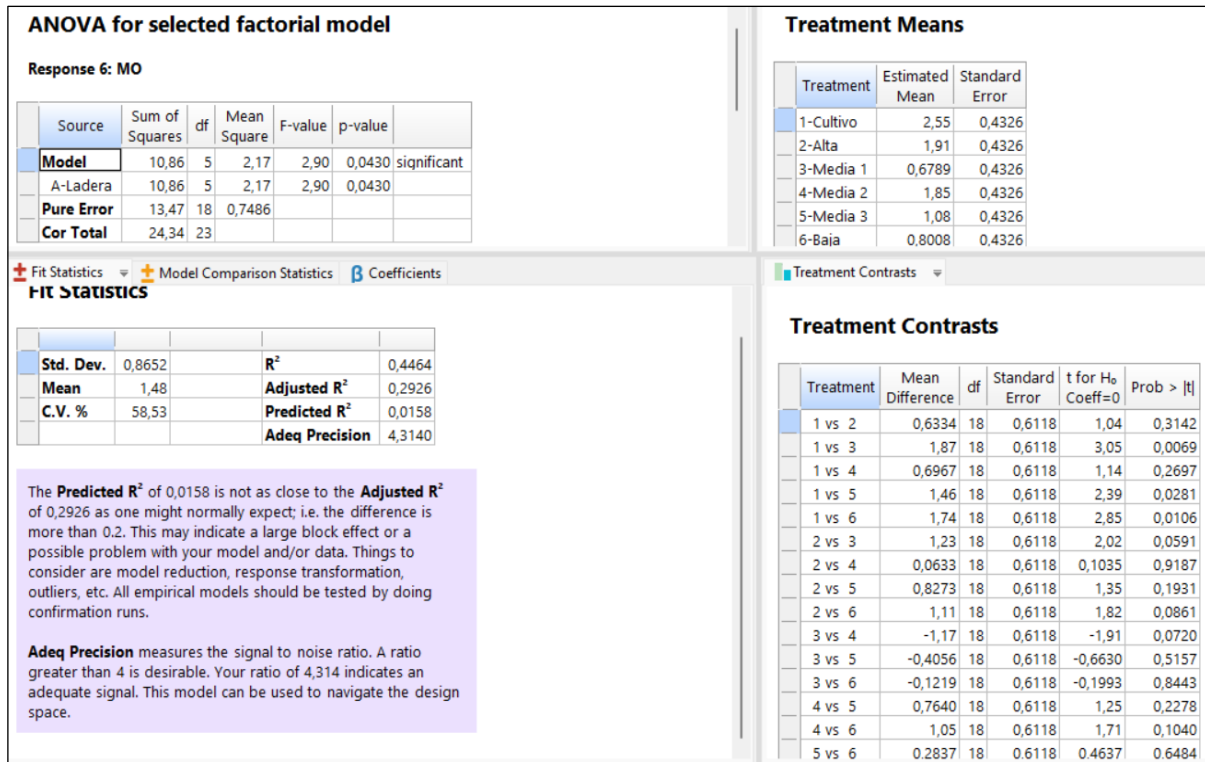
Fit Statistics				Treatment Contrasts										
Std. Dev.	0,1013		R²	0,7277	Treatment	Mean Difference	df	Standard Error	t for H ₀ Coeff=0	Prob > t				
Mean	1,35		Adjusted R²	0,6521	1 vs 2	-0,0119	18	0,0716	-0,1655	0,8704				
C.V. %	7,52		Predicted R²	0,5160	1 vs 3	-0,3381	18	0,0716	-4,72	0,0002				
			Adeq Precision	6,6766	1 vs 4	-0,3236	18	0,0716	-4,52	0,0003				
<p>The Predicted R² of 0,5160 is in reasonable agreement with the Adjusted R² of 0,6521; i.e. the difference is less than 0.2.</p> <p>Adeq Precision measures the signal to noise ratio. A ratio greater than 4 is desirable. Your ratio of 6,677 indicates an adequate signal. This model can be used to navigate the design space.</p>				<p>2 vs 5</p>						-0,3143	18	0,0716	-4,39	0,0004
				1 vs 6						-0,2239	18	0,0716	-3,13	0,0058
				2 vs 3						-0,3263	18	0,0716	-4,56	0,0002
				2 vs 4						-0,3118	18	0,0716	-4,35	0,0004
				2 vs 5						-0,3025	18	0,0716	-4,22	0,0005
				2 vs 6						-0,2121	18	0,0716	-2,96	0,0084
				3 vs 4						0,0145	18	0,0716	0,2023	0,8419
				3 vs 5						0,0238	18	0,0716	0,3318	0,7439
				3 vs 6						0,1142	18	0,0716	1,59	0,1283
				4 vs 5						0,0093	18	0,0716	0,1295	0,8984
				4 vs 6						0,0997	18	0,0716	1,39	0,1809
				5 vs 6						0,0904	18	0,0716	1,26	0,2228

Anexo 8. Estadística de la capacidad de intercambio cationico en cada una de las zonas de la ladera objeto de estudio.

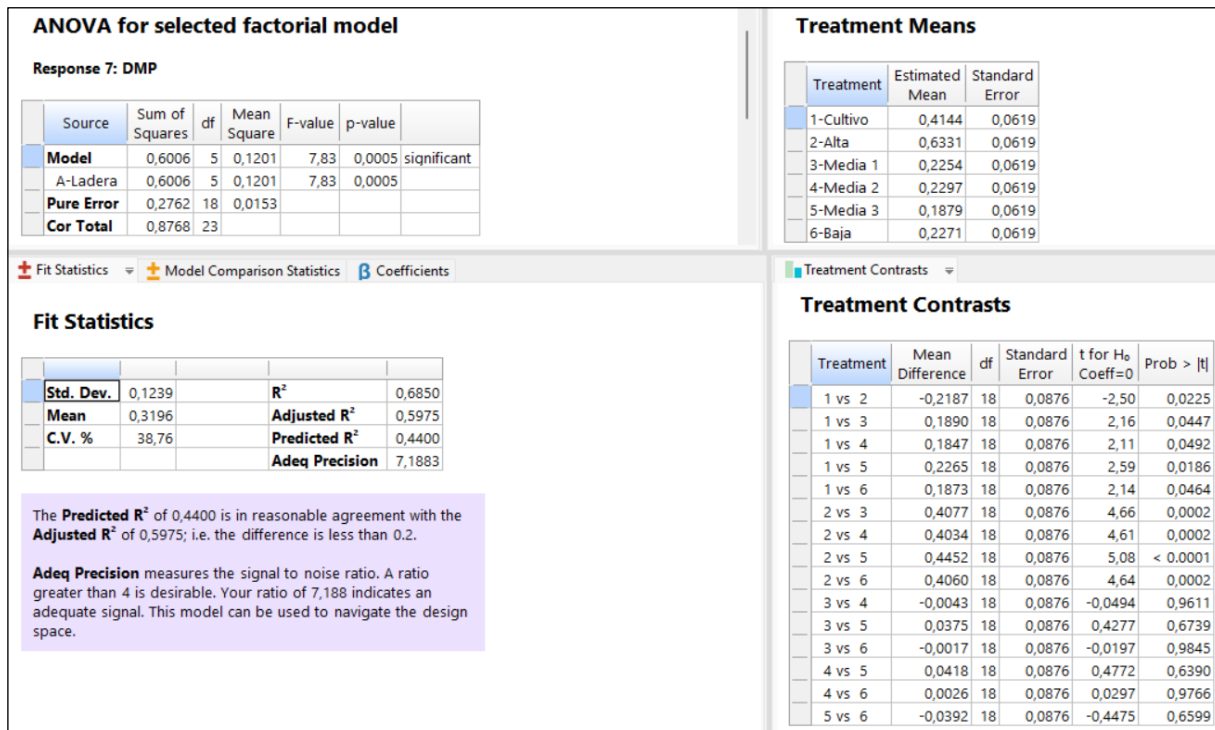
ANOVA for selected factorial model							Treatment Means		
Response 5: CIC									
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value		Treatment	Estimated Mean	Standard Error
Model	70,43	5	14,09	1,01	0,4413	not significant	1-Cultivo	12,00	1,87
A-Ladera	70,43	5	14,09	1,01	0,4413		2-Alta	13,66	1,87
Pure Error	251,48	18	13,97				3-Media 1	12,34	1,87
Cor Total	321,90	23					4-Media 2	8,73	1,87
							5-Media 3	10,60	1,87
							6-Baja	9,41	1,87

Fit Statistics				Treatment Contrasts										
Std. Dev.	3,74		R²	0,2188	Treatment	Mean Difference	df	Standard Error	t for H ₀ Coeff=0	Prob > t				
Mean	11,12		Adjusted R²	0,0018	1 vs 2	-1,66	18	2,64	-0,6287	0,5375				
C.V. %	33,60		Predicted R²	-0,3888	1 vs 3	-0,3471	18	2,64	-0,1313	0,8970				
			Adeq Precision	2,6356	1 vs 4	3,26	18	2,64	1,23	0,2327				
<p>A negative Predicted R² implies that the overall mean may be a better predictor of your response than the current model. In some cases, a higher order model may also predict better.</p> <p>Adeq Precision measures the signal to noise ratio. A ratio of 2,64 indicates an inadequate signal and you should not use this model to navigate the design space.</p>				1 vs 5						1,40	18	2,64	0,5287	0,6035
				1 vs 6						2,59	18	2,64	0,9791	0,3405
				2 vs 3						1,31	18	2,64	0,4973	0,6250
				2 vs 4						4,93	18	2,64	1,86	0,0788
				2 vs 5						3,06	18	2,64	1,16	0,2623
				2 vs 6						4,25	18	2,64	1,61	0,1253
				3 vs 4						3,61	18	2,64	1,37	0,1887
				3 vs 5						1,74	18	2,64	0,6600	0,5176
				3 vs 6						2,93	18	2,64	1,11	0,2815
				4 vs 5						-1,87	18	2,64	-0,7063	0,4890
				4 vs 6						-0,6765	18	2,64	-0,2559	0,8009
				5 vs 6						1,19	18	2,64	0,4504	0,6578

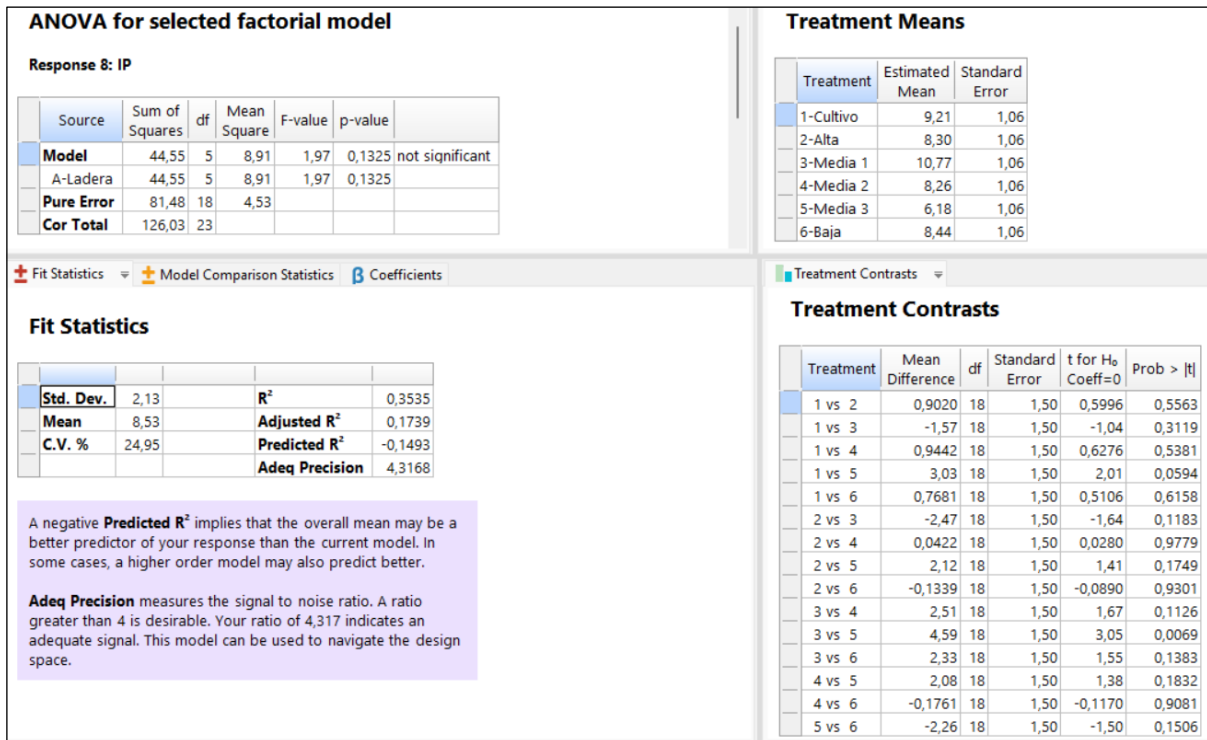
Anexo 9. Estadística de la Materia organica en cada una de las zonas de la ladera



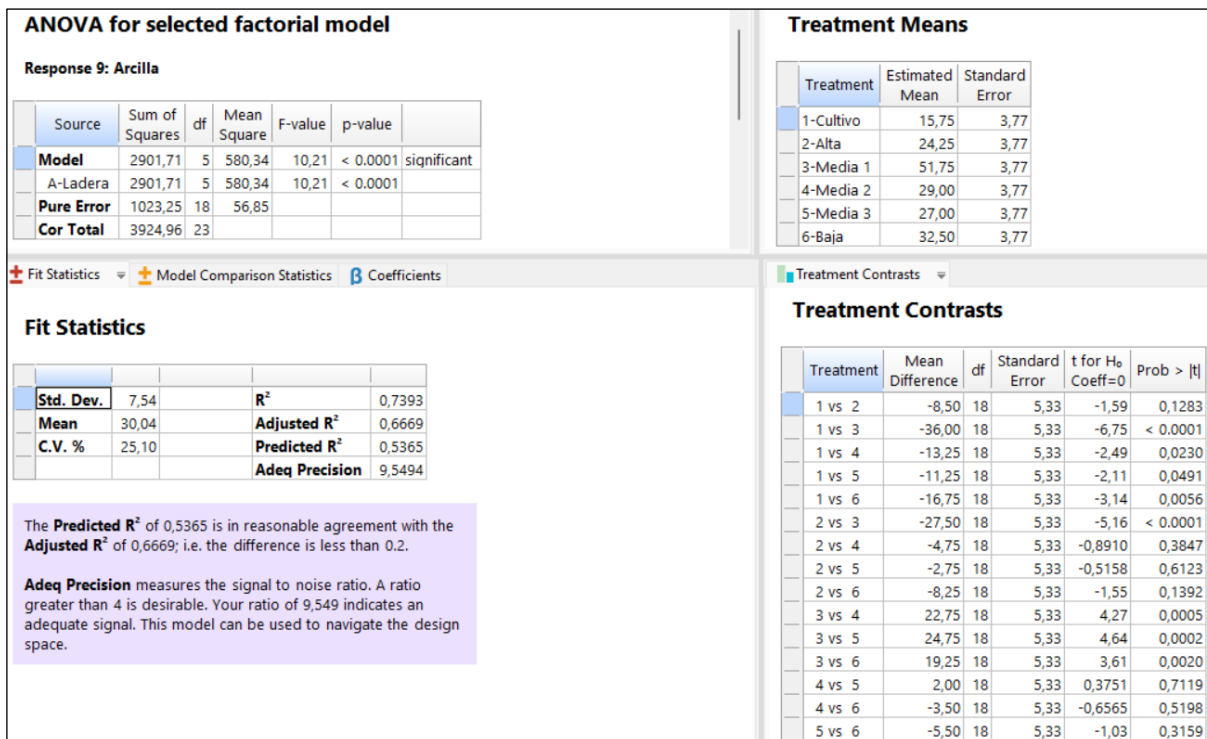
Anexo 10. Estadística del diámetro medio ponderado en cada una de las zonas de la ladera



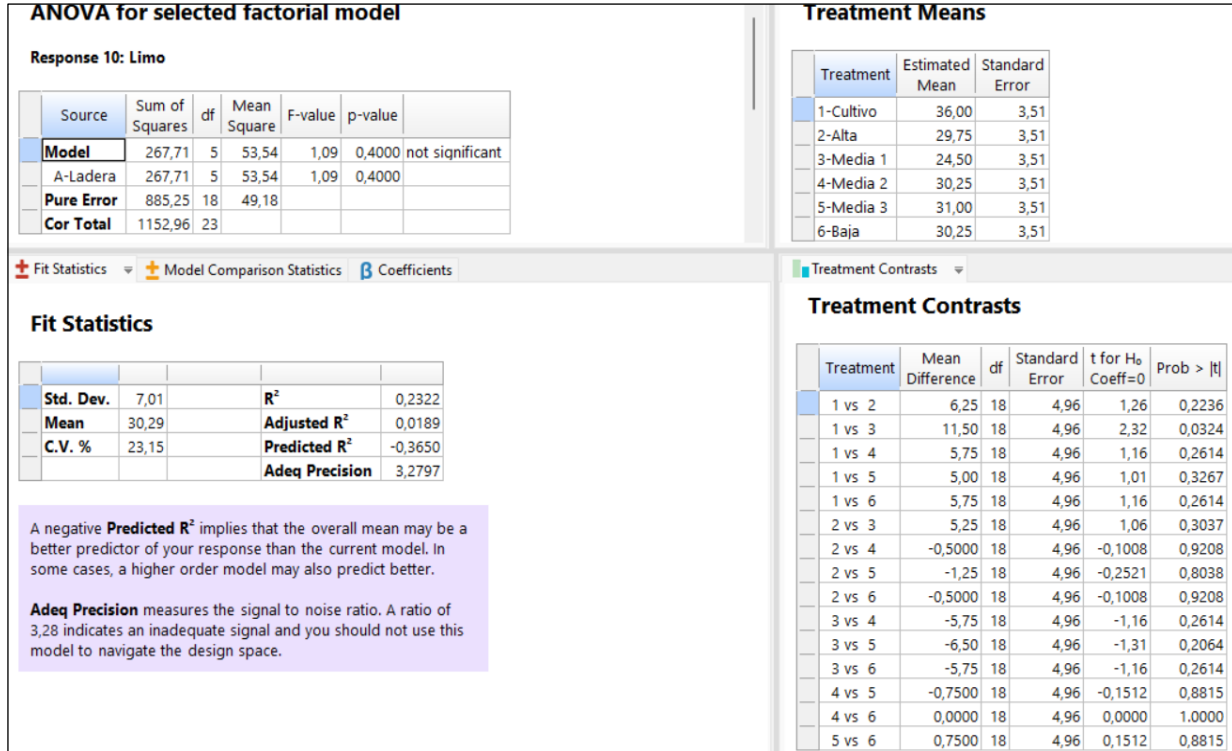
Anexo 11. Estadística del índice de plasticidad en cada una de las zonas de la ladera



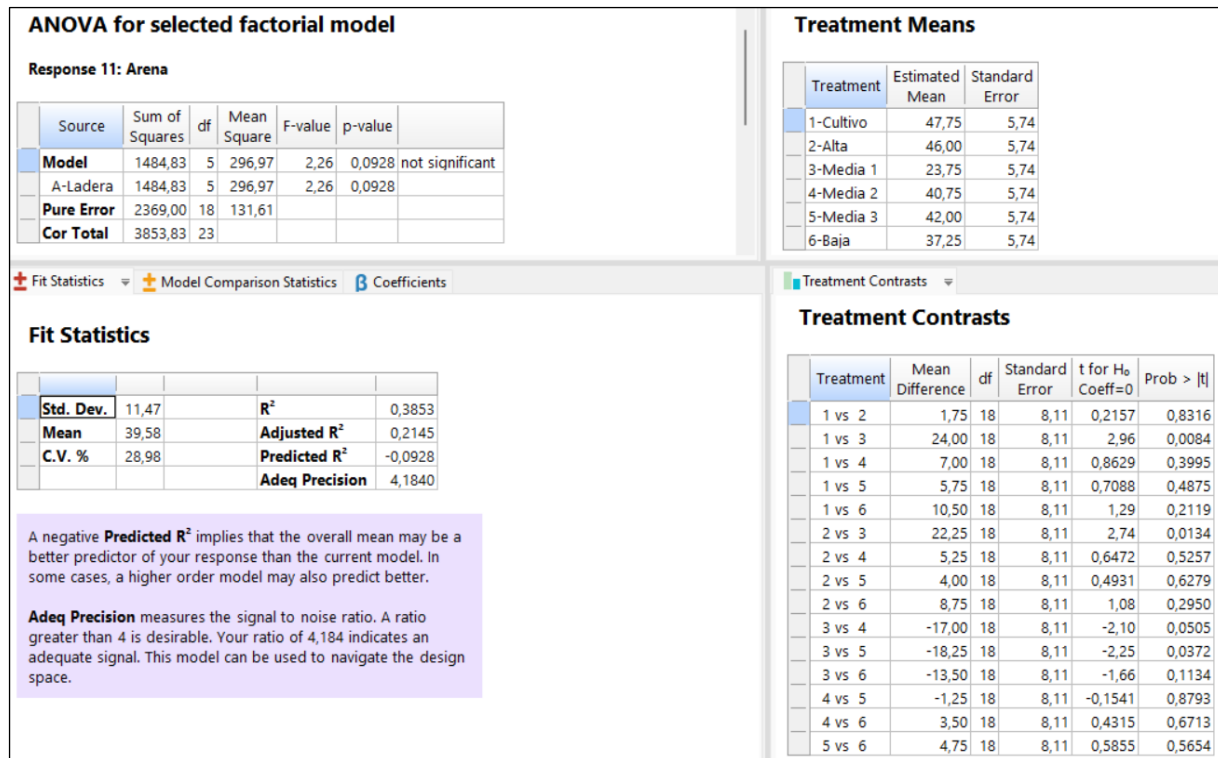
Anexo 12. Estadística de Arcilla en cada una de las zonas de la ladera



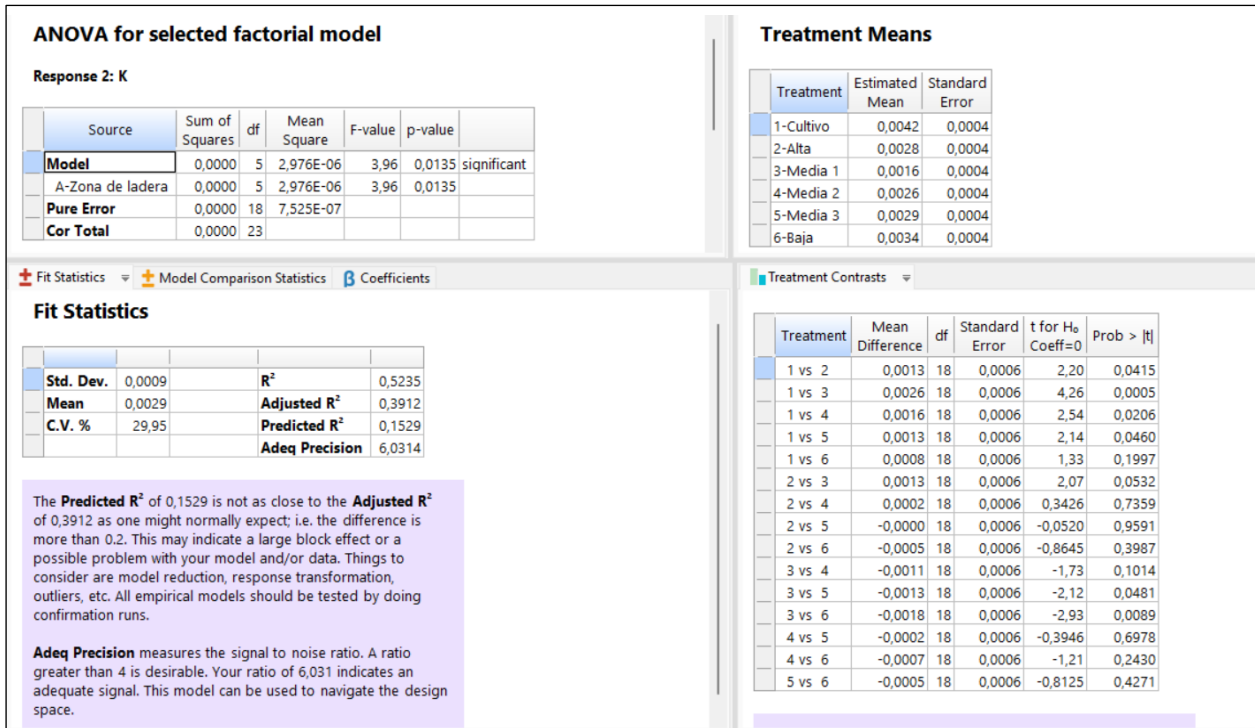
Anexo 13. Estadística de limo en cada una de las zonas de la ladera



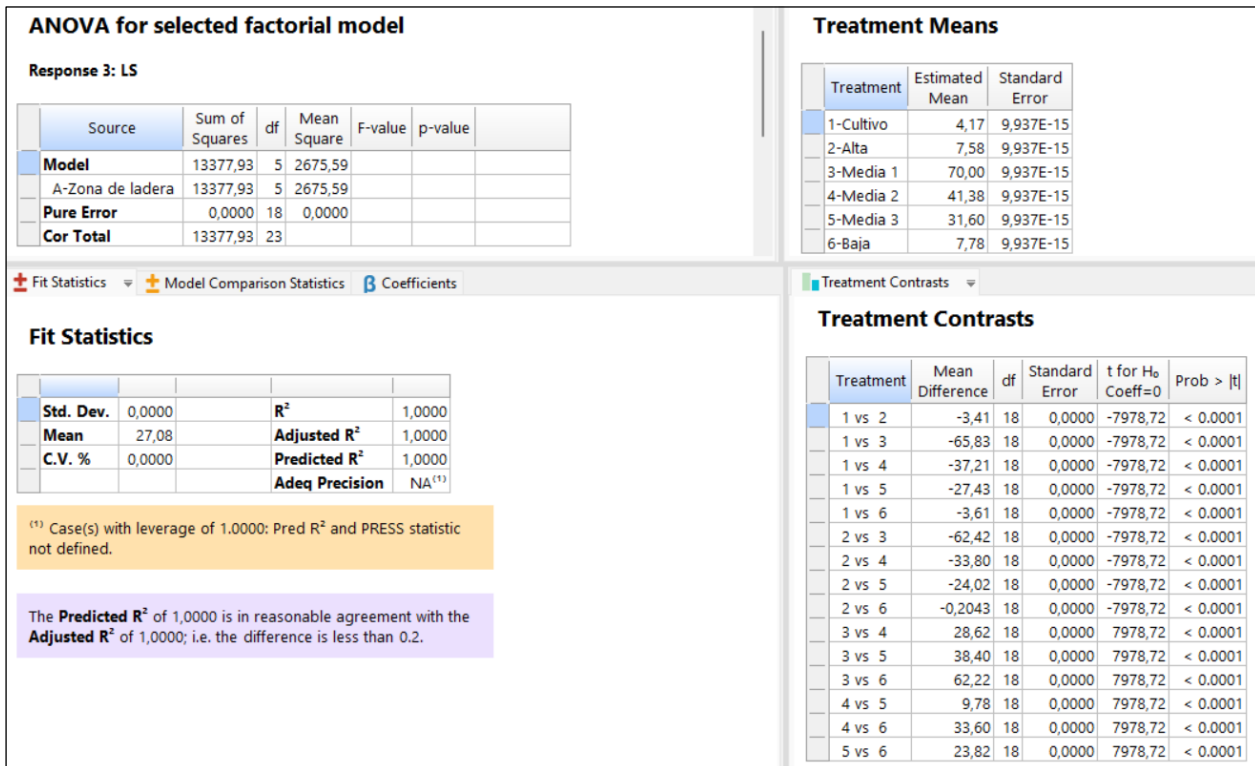
Anexo 14. Estadística de arena en cada una de las zonas de la ladera



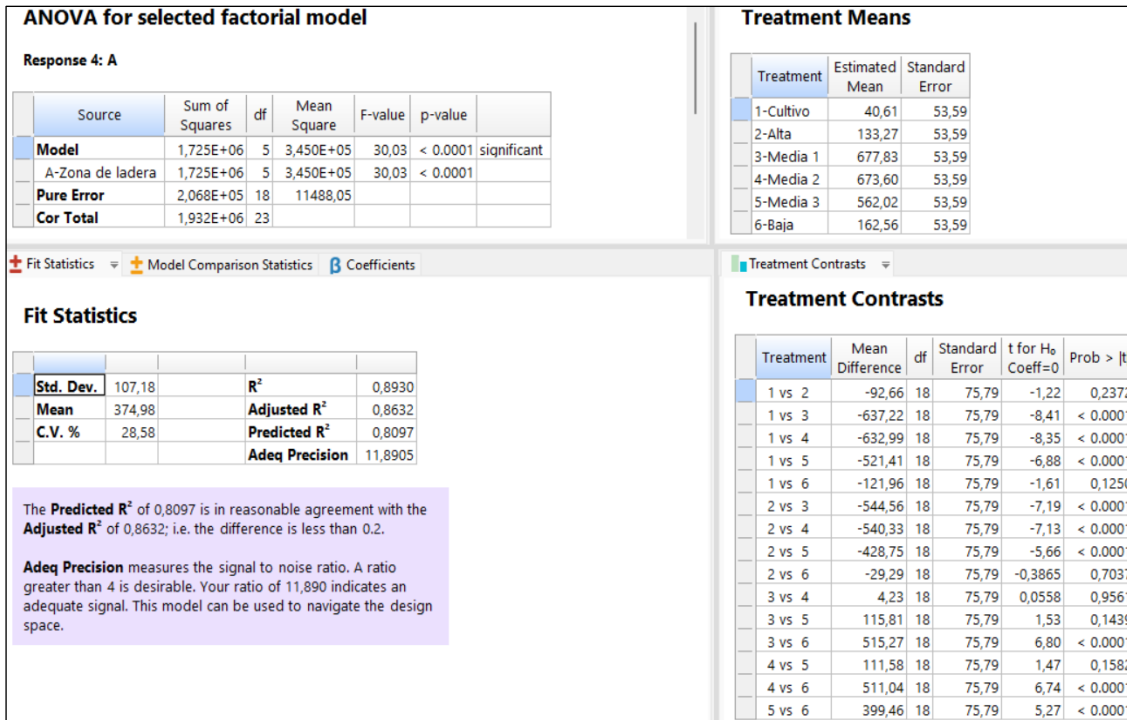
Anexo 15. Estadística de la erosionabilidad (K) en cada una de las zonas de la ladera



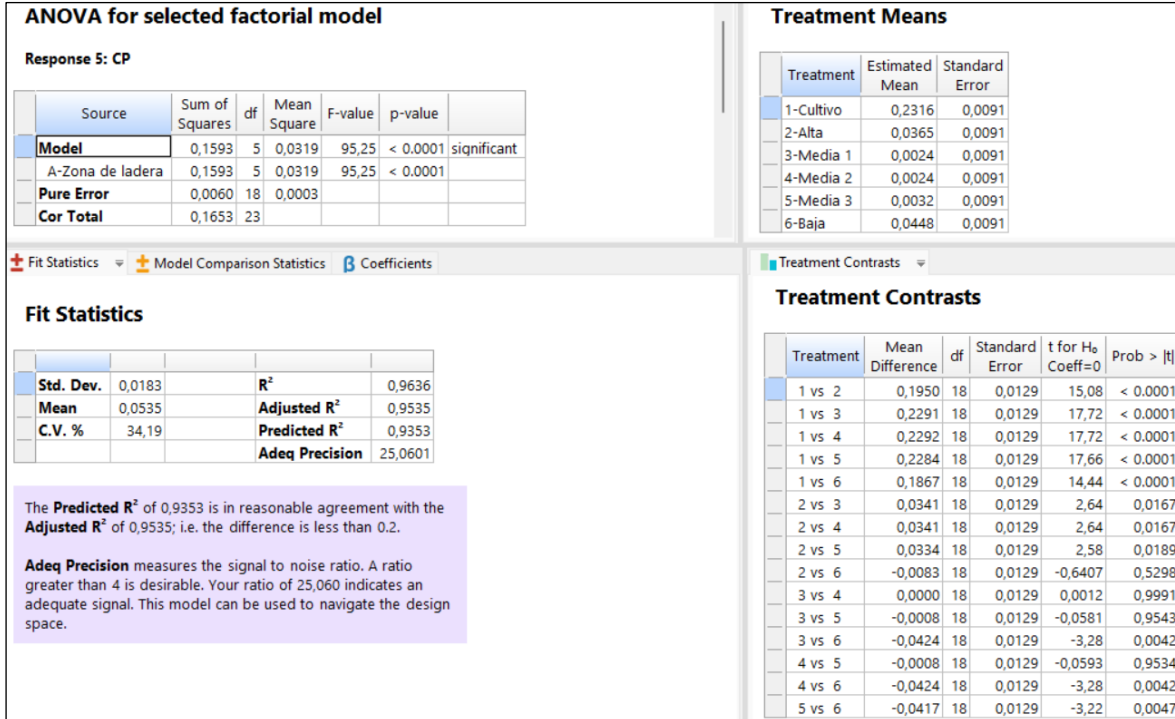
Anexo 16. Estadística de Factor LS en cada una de las zonas de la ladera



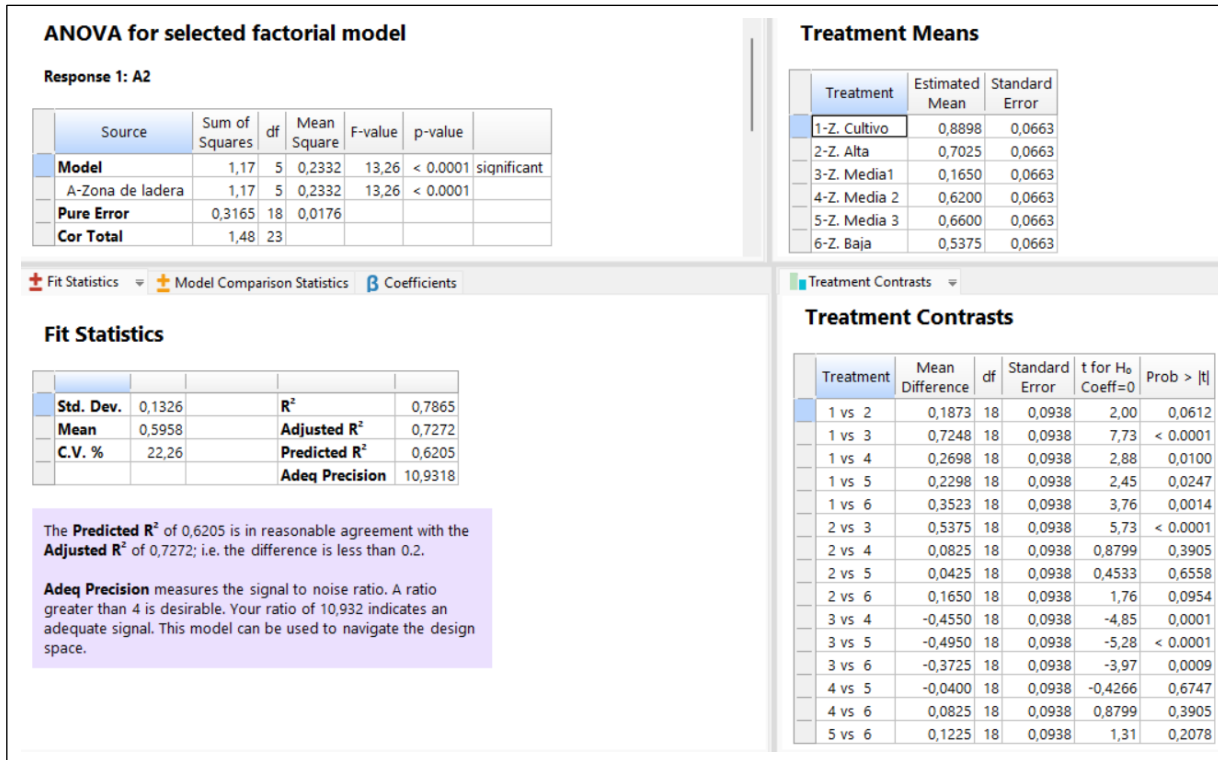
Anexo 17. Estadística de las pérdidas de suelo (A) en cada una de las zonas de la ladera



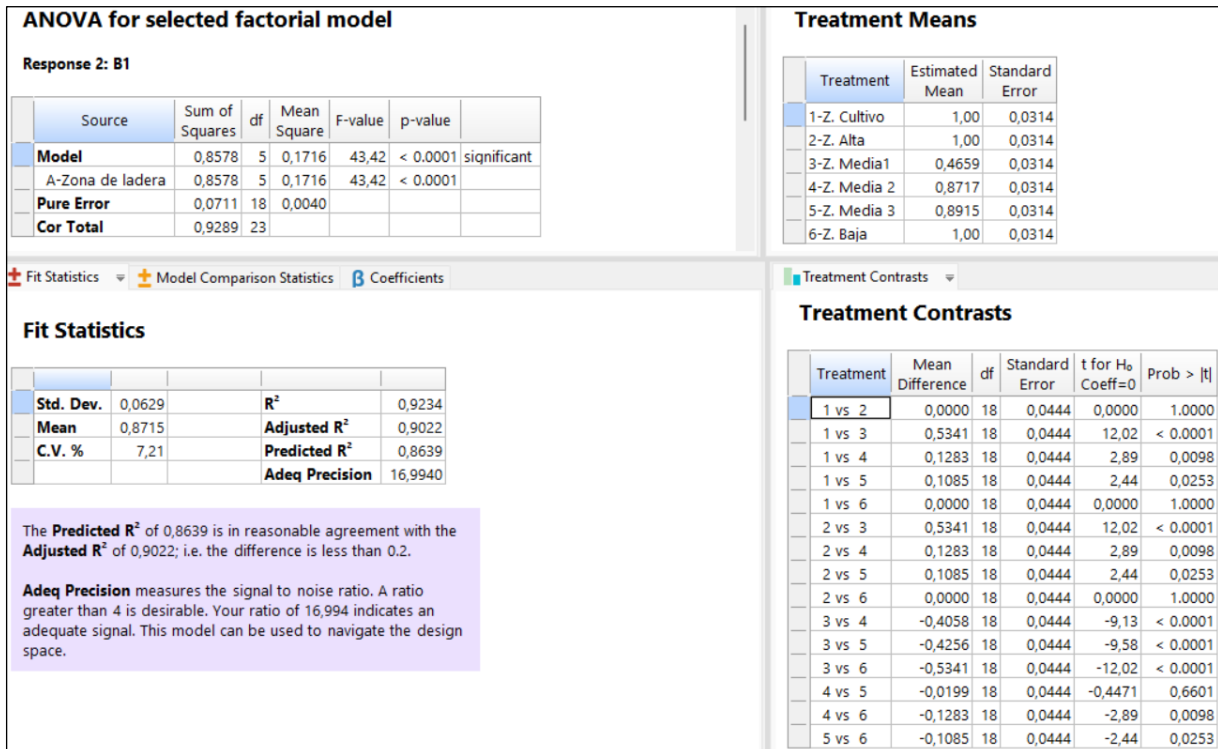
Anexo 18. Estadística de las pérdidas de suelo (CP) en cada una de las zonas de la ladera



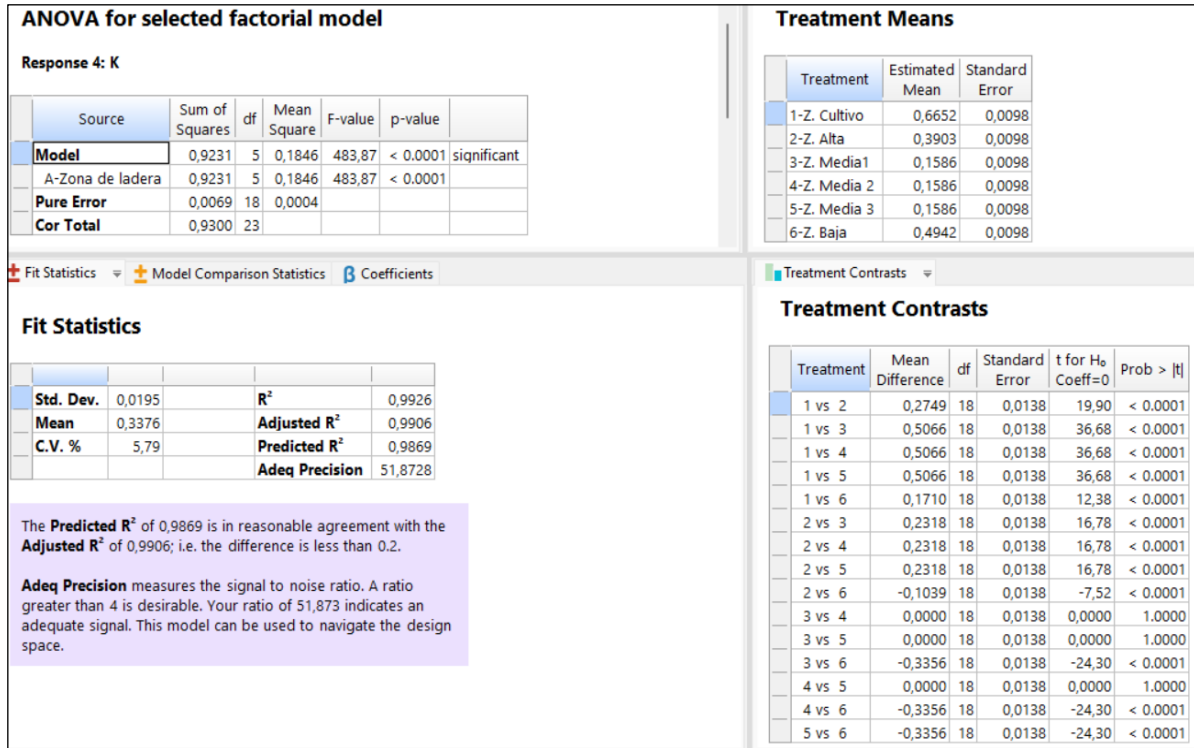
Anexo 19. Estadística del Subfactor A2, en cada una de las zonas de la ladera



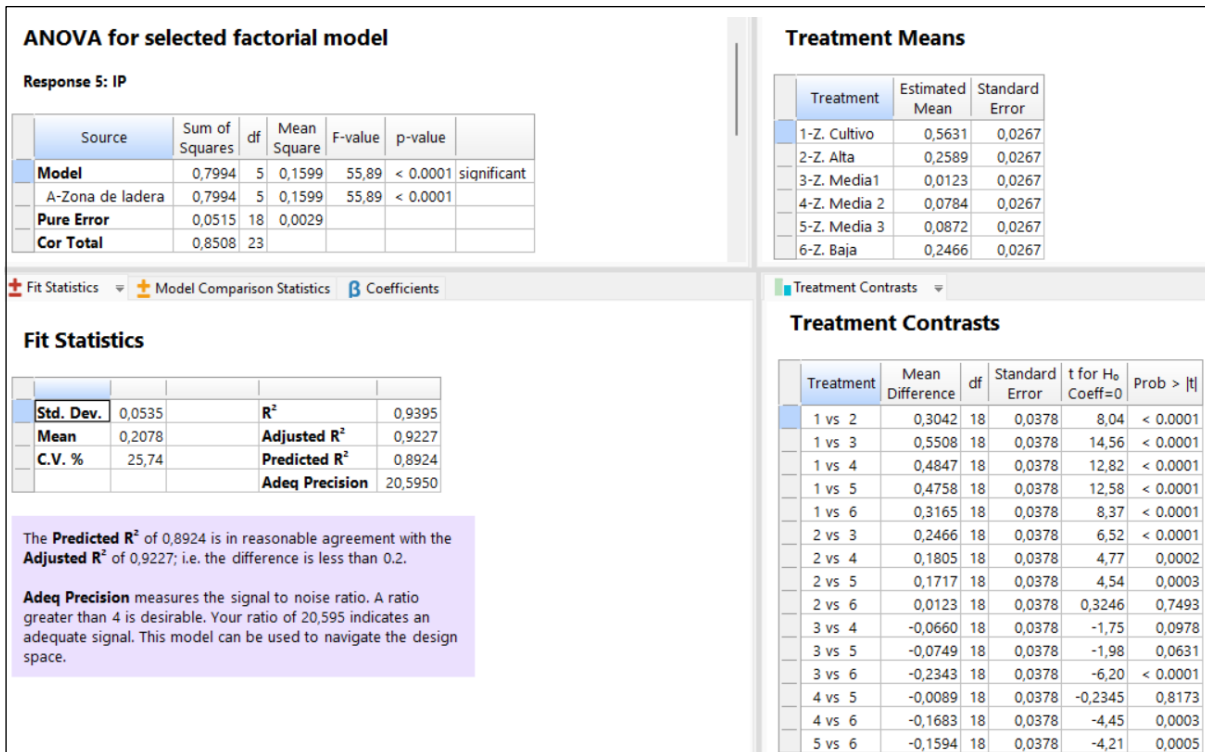
Anexo 20. Estadística del Subfactor B1, en cada una de las zonas de la ladera



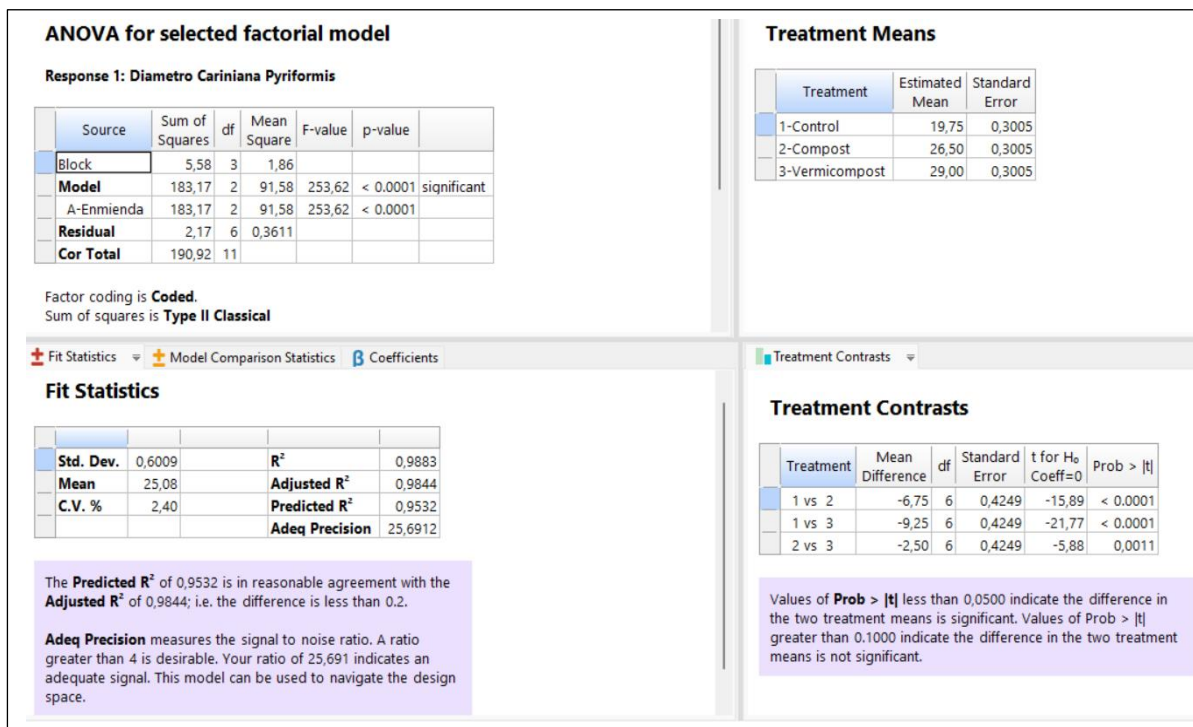
Anexo 21. Estadística del Subfactor K, en cada una de las zonas de la ladera



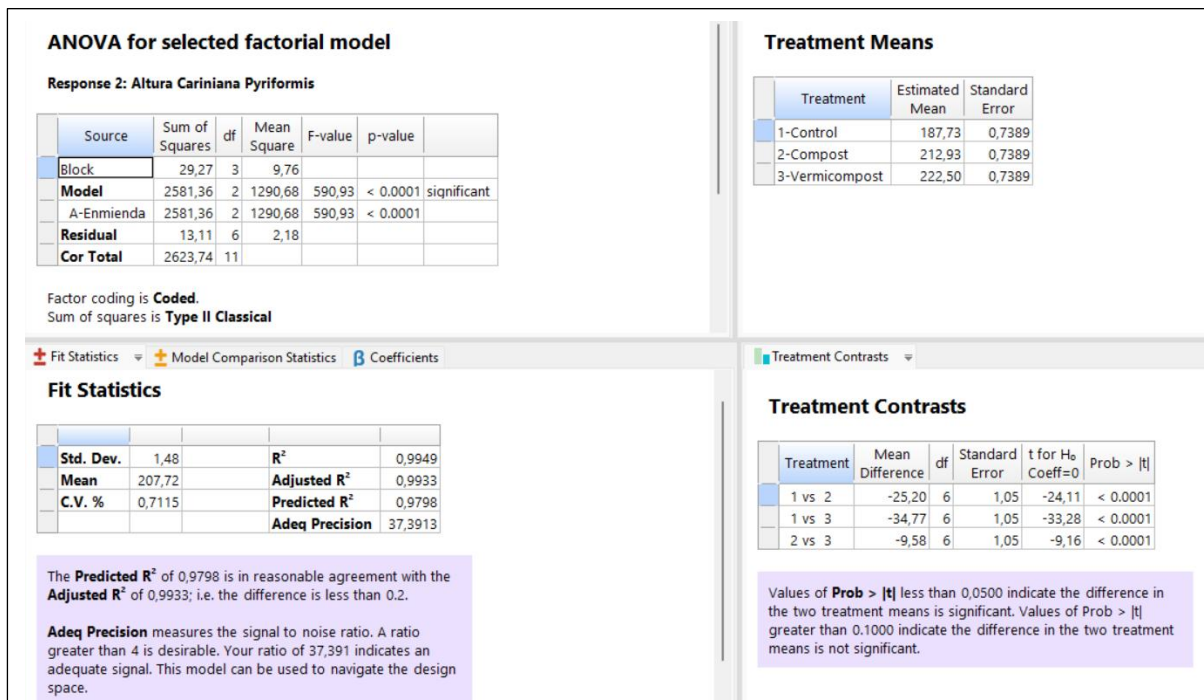
Anexo 22. Estadística del indice de productividad, en cada una de las zonas de la ladera



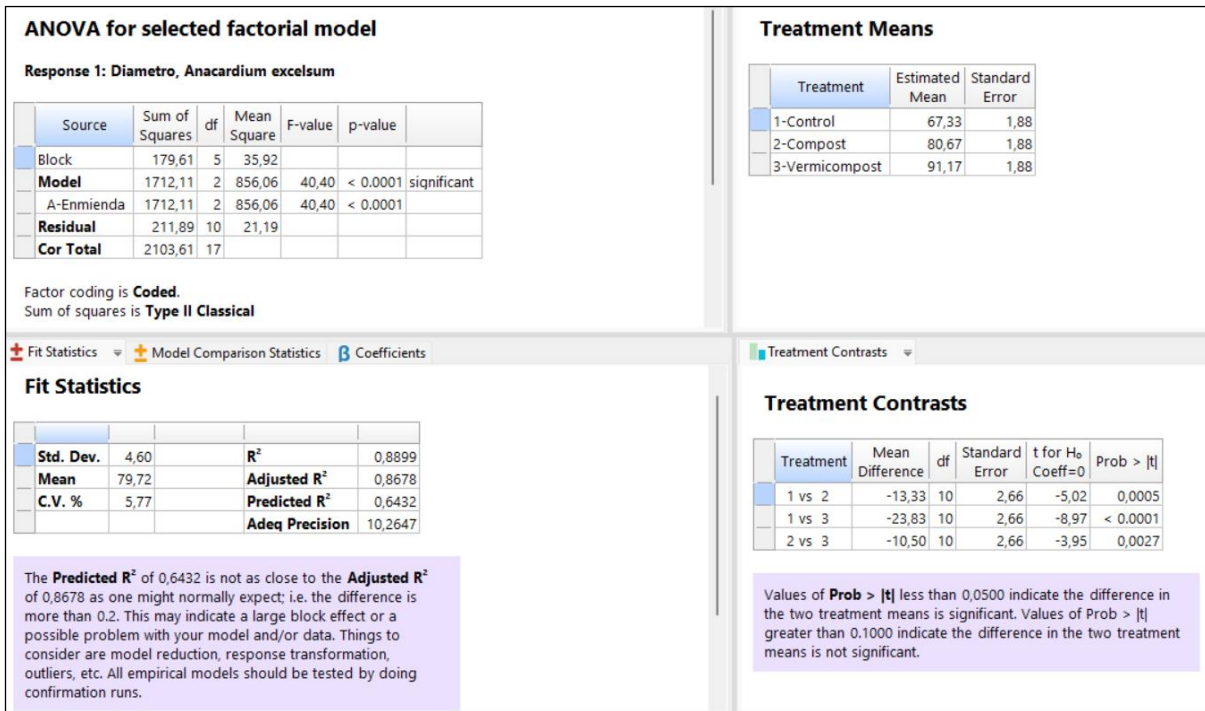
Anexo 23. Estadística del crecimiento en diámetro para la especie Cariniana Piriformis



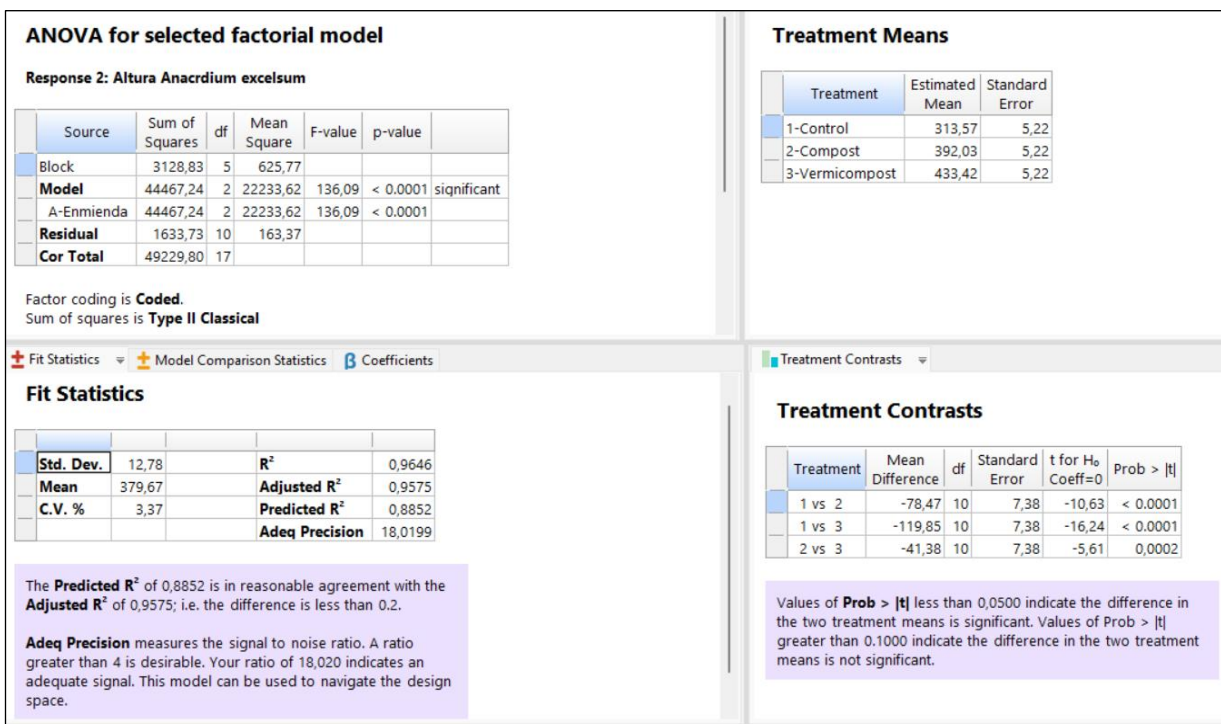
Anexo 24. Estadística del crecimiento en Altura para la especie Cariniana Piriformis



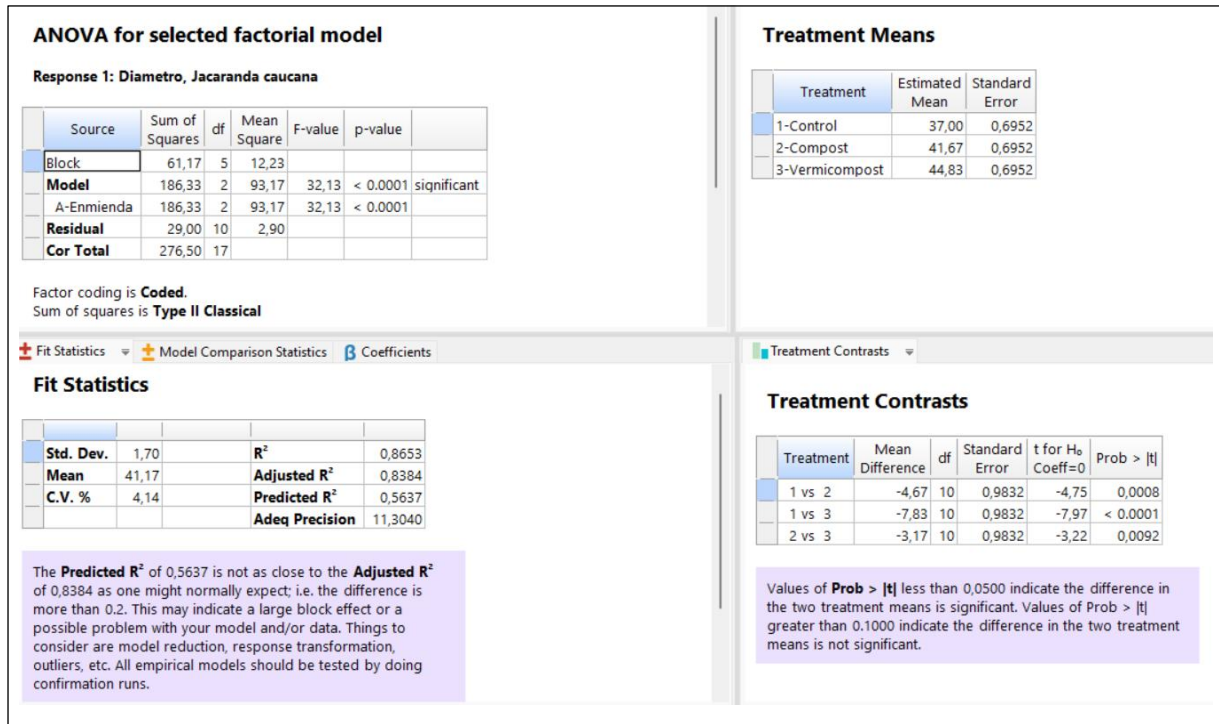
Anexo 25. Estadística del crecimiento en Diámetro para la especie Anacardium excelsum



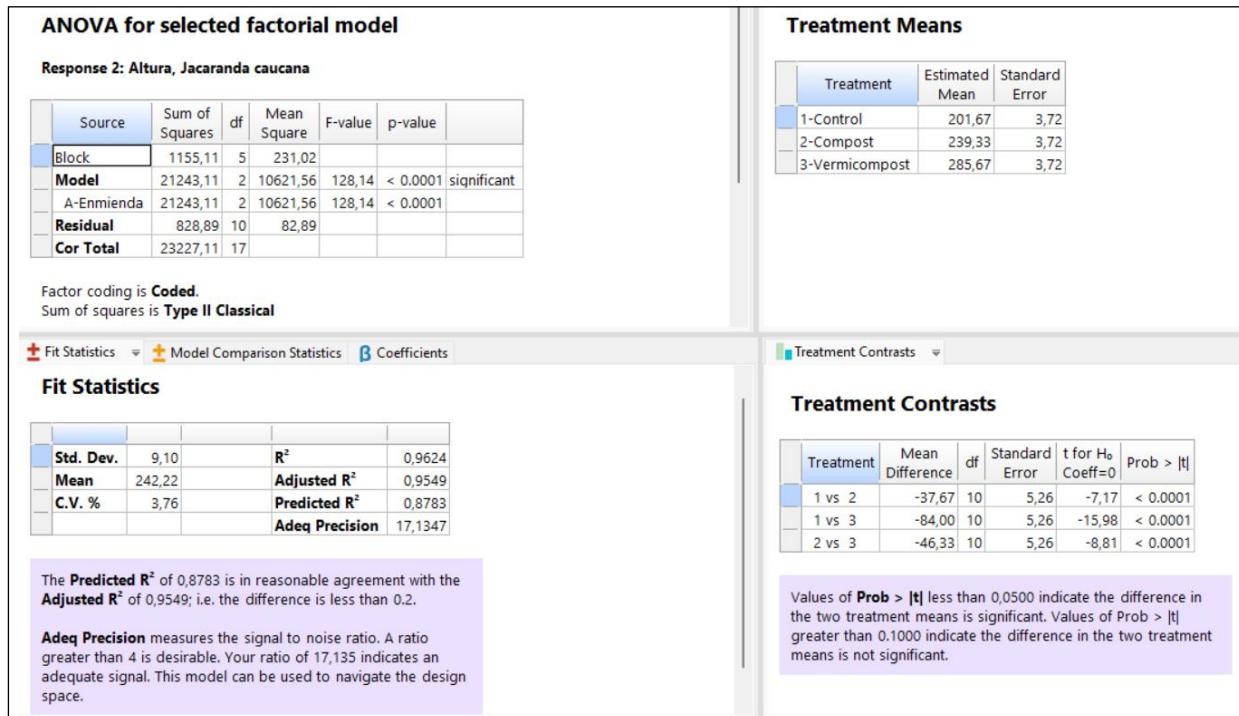
Anexo 26. Estadística del crecimiento en Altura para la especie Anacardium excelsum



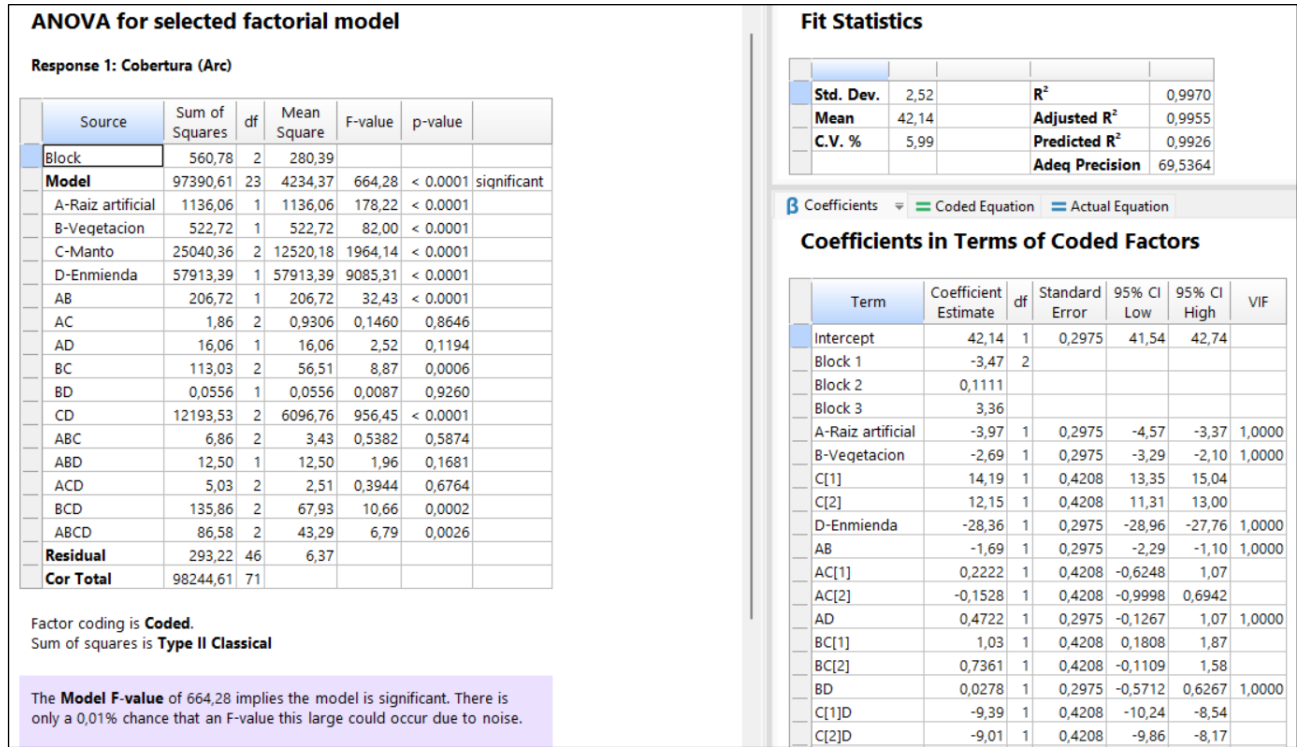
Anexo 27. Estadística del crecimiento en Diametro para la especie Jacaranda Caucana



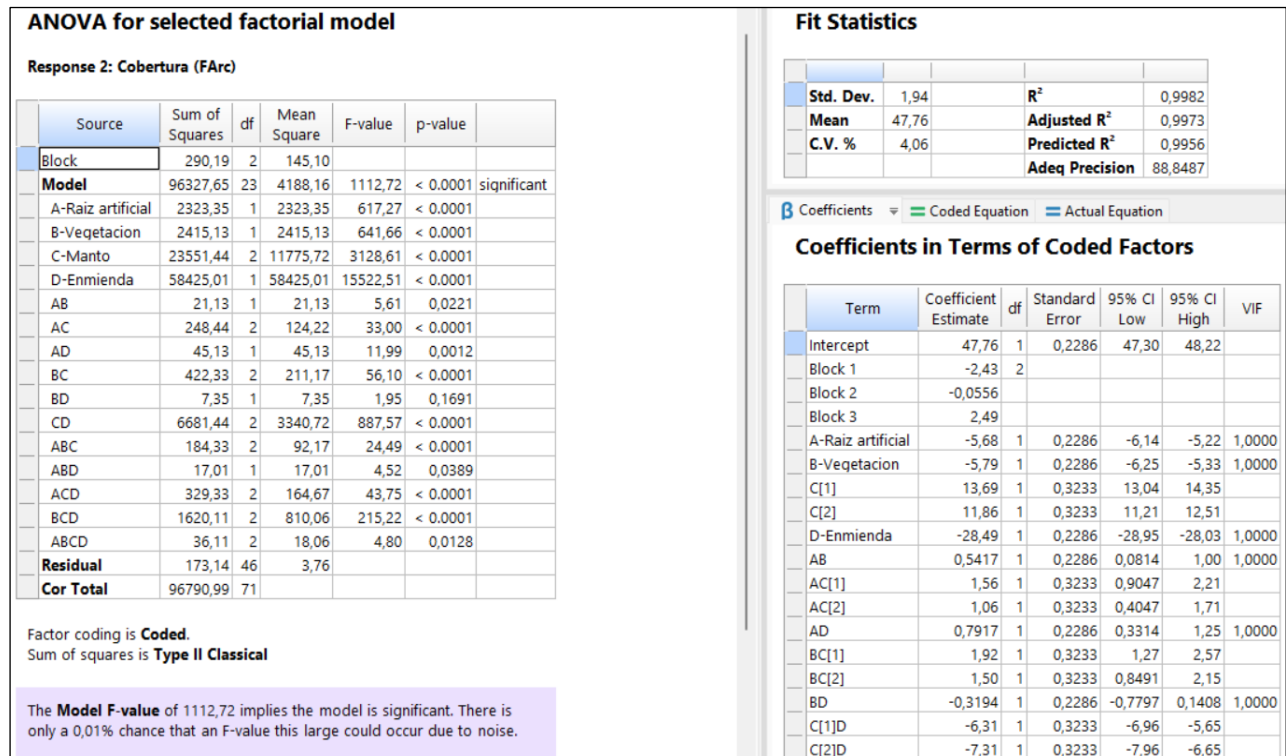
Anexo 28. Estadística del crecimiento en Altura para la especie Jacaranda Caucana



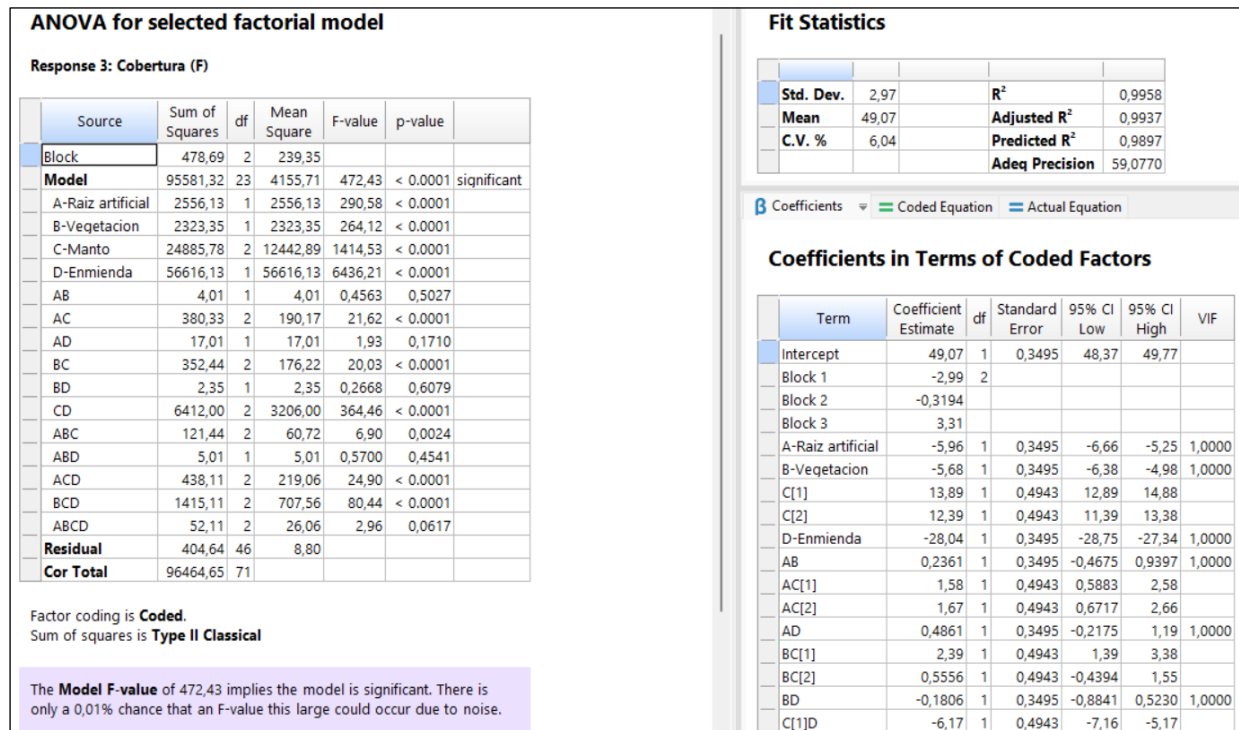
Anexo 29. Estadística del desarrollo de cobertura en la zona media de ladera con clase



Anexo 30. Estadística del desarrollo de cobertura en la zona media de ladera con clase textural franco Arcillosa.



Anexo 31. Estadística del desarrollo de cobertura en la zona media de ladera con clase textural franco .



Anexo 32. Estadística de las pérdidas de suelo (A2) en cada una de las zonas de la ladera, implementando el factor C y P obtenidos en la rehabilitación de las zonas de ladera.

