

DETERMINACIÓN DEL ARRASTRE DE NITRATO (NO_3^-), FOSFATO (PO_4^{-3}), Y SUELO POR ACCIÓN DE LA ESCORRENTIA SUPERFICIAL EN PARCELAS PERMANENTES EN PROCESO DE SUCESIÓN NATURAL

PAOLA JIMENA MUÑOZ SILVA

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA
POPAYÁN
2007**

DETERMINACIÓN DEL ARRASTRE DE NITRATO (NO_3^-), FOSFATO (PO_4^{3-}), Y SUELO POR ACCIÓN DE LA ESCORRENTIA SUPERFICIAL EN PARCELAS PERMANENTES EN PROCESO DE SUCESIÓN NATURAL

PAOLA JIMENA MUÑOZ SILVA

PhD APOLINAR FIGUEROA CASAS
Director

Mg EDIER HUMBERTO PÉREZ
Asesor

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES EXACTAS Y DE LA EDUCACIÓN
DEPARTAMENTO DE BIOLOGÍA
POPAYÁN
2007

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	10
INTRODUCCIÓN	11
1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
2. JUSTIFICACIÓN	13
3. OBJETIVOS	15
3.1 OBJETIVO GENERAL	15
3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	15
4. HIPÓTESIS	16
5. MARCO TEÓRICO	17
5.1 DEFINICIÓN DE TERMINOS	17
5.1.1 CICLO DEL NITRÓGENO	17
5.1.1.1 Fijación del nitrógeno	18
5.1.1.2 Amonificación	18
5.1.1.3 Nitrificación	18
5.1.1.4 Desnitrificación	19
5.1.1.5 Absorción del nitrógeno por la planta	19
5.1.2 CICLO DEL FÓSFORO	19
5.1.2.1 Ciclo global del fósforo	21
5.1.2.2 Absorción del fósforo por la planta	21
5.2 EROSIÓN	22
5.2.1 DEFINICIONES	22
5.2.2 CLASES DE EROSIÓN DEL SUELO	22
5.2.2.1 Erosión hídrica	22
5.2.2.2 Erosión eólica	23
5.3 PÉRDIDA DE NUTRIENTES DEL SUELO POR EROSIÓN	23
5.4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS	24
5.4.1 Textura del suelo	24
5.4.2 Humedad	24
5.4.3 Densidad aparente	25
5.4.4 Densidad real	25
5.4.5 Porosidad total	25
5.4.6 Conductividad hidráulica	25
6. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	26
6.1 ASPECTOS BIOFÍSICOS	26
6.1.1 Ubicación geográfica y superficie	26

6.1.2	Núcleos poblados	26
6.1.3	Precipitación	26
6.1.4	Temperatura	26
6.1.5	Humedad relativa	27
6.1.6	Brillo solar	27
6.1.7	Vientos	27
6.1.8	Zonas de vida	27
6.1.9	Geología	27
6.1.10	Geomorfología	27
6.1.11	Suelos	28
6.2	UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	28
7.	ANTECEDENTES	31
8.	MEDODOLOGIA	33
8.1	CONSTRUCCIÓN DE LAS PARCELAS PERMANENTES	33
8.1.1	Parcelas experimentales	33
8.1.2	Canal colector	33
8.1.3	Colectores	33
8.2	MÉTODOS DE MUESTREO	33
8.2.1	Pluviometria	33
8.2.2	Evaluación inicial de las parcelas experimentales	35
8.2.3	Toma de muestras	35
8.3	MÉTODOS DE LABORATORIO	36
8.3.1	Método de determinación de Nitratos NO_3^-	36
8.3.2	Método de determinación de Fosfatos PO_4^{-3}	37
8.3.3	Conductividad	37
8.3.4	pH	38
8.3.5	Sedimentos	38
8.4	MÉTODOS DE ANÁLISIS FÍSICO DE SUELOS	39
8.4.1	Textura del suelo	39
8.4.2	Humedad	39
8.4.3	Densidad aparente	39
8.4.4	Densidad real	40
8.4.5	Porosidad total	40
8.4.6	Conductividad hidráulica o permeabilidad	41
8.5	IDENTIFICACIÓN DE PLANTAS	42
8.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	42
9.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
9.1	CONCENTRACIÓN DE NITRATOS Y FOSFATOS EN LA ESCORRENTIA	43
9.2	PRUEBAS NO PARAMÉTRICAS PARA NITRATOS Y FOSFATOS	46
9.2.1	Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon de pares coincidentes para nitratos	46

9.2.2 Prueba de los rangos con signo de wilcoxon de pares coincidentes para fosfatos	47
9.3 PRECIPITACIÓN	48
9.4 ANÁLISIS DE LOS VOLÚMENES DE AGUA DE ESCORRENTÍA Y DE SUELO ARRASTRADO	49
9.4.1 Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon de pares coincidentes para suelo arrastrado	53
9.4.2 Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon de pares coincidentes para escorrentía	54
9.4.3 Regresión exponencial escorrentía vs suelo arrastrado	55
9.4.3.1 Regresión exponencial escorrentía vs suelo arrastrado tratamiento suelo desnudo	55
9.4.3.2 Regresión exponencial escorrentía vs suelo arrastrado tratamiento cobertura vegetal en proceso de sucesión natural	56
9.5 CONDUCTIVIDAD DEL AGUA DE ESCORRENTÍA	57
9.5.1 Prueba de Mann-Whitney para conductividad	59
9.6 pH EN EL AGUA DE ESCORRENTÍA	59
9.6.1 Prueba de Mann-Whitney para pH	60
9.7 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	61
9.7.1 Textura	61
9.7.2 Humedad	62
9.7.3 Densidad real	62
9.7.4 Densidad aparente	63
9.7.5 Porosidad total	65
9.7.6 Conductividad hidráulica o permeabilidad	66
9.8 COBERTURA VEGETAL	68
9.8.1 Porcentaje de cobertura vegetal	70
9.9 PAUTAS GENERALES PARA LA CONSERVACIÓN DE SUELOS EN LADERA	78
10. CONCLUSIONES	80
11. RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXO	87

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ciclo del Nitrógeno.	17
Figura 2. Ciclo del Fósforo.	20
Figura 3. Ciclo global del Fósforo.	21
Figura 4. Localización de la zona de estudio, Jardín Botánico Álvaro José Negret, Corregimiento La Rejoya	29.
Figura 5. Plano distribución del Jardín Botánico Álvaro José Negret	30
Figura 6. Parcela de escorrentía	34
Figura 7. Colector de escorrentía	34
Figura 8. Pluviómetro artesanal	35
Figura 9. Muestras de escorrentía sedimentadas	38
Figura 10. Picnómetros densidad real	40
Figura 11. Permeámetro de la Universidad del Cauca	41
Figura 12. Comparación de la concentración de nitratos con precipitación	44
Figura 13. Comparación de la concentración de fosfatos con precipitación	44
Figura 14. Precipitación registrada durante el estudio	49
Figura 15. Comparación de suelo arrastrado con escorrentía tratamiento de suelo desnudo	50
Figura 16. Comparación de suelo arrastrado con escorrentía tratamiento cobertura vegetal.	52
Figura 17. Regresión exponencial escorrentía vs suelo arrastrado tratamiento suelo desnudo	55
Figura 18. Regresión exponencial escorrentía vs suelo arrastrado tratamiento cobertura vegetal en proceso de sucesión natural	56
Figura 19. Conductividad en los meses de muestreo	58
Figura 20. Ubicación de las parcelas	70
Figura 21. Parcela 1 Abril	71
Figura 22. Parcela 1 Mayo	71
Figura 23. Parcela 1 Junio	71
Figura 24. Parcela 1 Julio	71
Figura 25. Parcela 1 Agosto	71
Figura 26. Parcela 2 Abril	72
Figura 27. Parcela 2 mayo	72
Figura 28. Parcela 2 Junio	72
Figura 29. Parcela 2 Julio	72
Figura 30. Parcela 2 Agosto	72
Figura 31. Parcela 3 Abril	73
Figura 32. Parcela 3 Mayo	73
Figura 33. Parcela 3 Junio	73

Figura 34. Parcela 3 Julio	73
Figura 35. Parcela 3 Agosto	73
Figura 36. Parcela 1 al inicio de la investigación	75
Figura 37. Parcela 1 al final de la investigación	75
Figura 38. Parcela 2 al inicio de la investigación	76
Figura 39. Parcela 2 al final de la investigación	76
Figura 40. Parcela 3 al inicio de la investigación	77
Figura 41. Parcela 3 al final de la investigación	77

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Totales mensuales de nitratos y fosfatos tratamiento 1	43
Tabla 2. Totales mensuales de nitratos y fosfatos tratamiento 2	45
Tabla 3. Rangos de la prueba de Wilcoxon para nitratos.	47
Tabla 4. Estadística de contraste prueba de Wilcoxon para nitratos	47
Tabla 5. Rangos de la prueba de Wilcoxon para fosfatos	47
Tabla 6. Estadística de contraste prueba de Wilcoxon para fosfatos	48
Tabla 7. Precipitación registrada durante el estudio	48
Tabla 8. Totales mensuales de escorrentía y suelo arrastrado (Kg) en el tratamiento 1(suelo desnudo)	49
Tabla 9. Totales mensuales de escorrentía y suelo arrastrado (g) en el tratamiento 1 (suelo desnudo)	50
Tabla 10. Totales mensuales de escorrentía y suelo arrastrado (Kg) en el tratamiento 2 (cobertura vegeta)	51
Tabla 11. Totales mensuales de escorrentía y suelo arrastrado (g) en el tratamiento 2 (cobertura vegeta)	51
Tabla 12. Suelo arrastrado en los dos tratamientos suelo desnudo (TTO 1) Y cobertura vegetal (TTO 2)	53
Tabla 13. Rangos de la prueba de Wilcoxon para suelo arrastrado	54
Tabla 14. Estadística de contraste prueba de Wilcoxon para suelo arrastrado	54
Tabla 15. Rangos de la prueba de Wilcoxon para escorrentía	54
Tabla 16. Estadística de contraste prueba de Wilcoxon para escorrentía	55
Tabla 17. Conductividad del tratamiento de suelo desnudo y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural	58
Tabla 18. Prueba de Mann-Whitney para conductividad	59
Tabla 19. pH del tratamiento de suelo desnudo y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural	60
Tabla 20. Prueba de Mann-Whitney para pH	60
Tabla 21. Textura	61
Tabla 22. Humedad	62
Tabla 23. Prueba de Mann-Whitney para humedad	62
Tabla 24. Densidad real	62
Tabla 25. Prueba de Mann-Whitney para densidad real	63
Tabla 26. Densidad aparente	63
Tabla 27. Análisis de varianza univariante para densidad aparente	64
Tabla 28. Prueba de Duncan para la densidad aparente	64
Tabla 29. Porosidad total	65
Tabla 30. Análisis de varianza univariante para la porosidad total	65

Tabla 31. Prueba de Duncan para la porosidad total	66
Tabla 32. Conductividad hidráulica o permeabilidad	66
Tabla 33. Prueba de Mann-Whitney para conductividad hidráulica	67
Tabla 34. Listado de las especies inventariadas en las parcelas en proceso de sucesión natural	69
Tabla 35. Porcentaje de cobertura vegetal	74

RESUMEN

La erosión hídrica es un factor trascendental en la degradación del suelo y alteración de la integridad de los ecosistemas y ciclos ecológicos, que ocasionan un arrastre de nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, como el Fósforo y el Nitrógeno. Se planteo este experimento piloto con el fin de contribuir al conocimiento de la situación ambiental que ocasiona la erosión hídrica y el arrastre de nutrientes en zonas de ladera, mediante la construcción y monitoreo de parcelas permanentes (de 50 m² de área), para cuantificar la pérdida de suelo y nutrientes (nitratos NO₃⁻ y fosfatos PO₄⁻³) arrastrados por escorrentía superficial durante 6 meses del año, en parcelas con cobertura en proceso de sucesión natural y suelo desnudo.

Con el desarrollo de este trabajo se determinó que el arrastre de nitrato NO₃⁻ fue de 0.540 y 0.394 mg/Lm² en las parcelas de suelo desnudo y cobertura vegetal respectivamente. Los fosfatos PO₄⁻³ en los dos tratamientos vario entre 0.0386 y 0.0396 mg/Lm² presentándose un leve incremento en las parcelas de suelo desnudo. En la escorrentía superficial se obtuvo un mayor valor en el suelo desnudo que en la cobertura vegetal, de 2125 y 1776 L, respectivamente. Los valores de escorrentía, están relacionados con la intensidad de la lluvia, la cobertura vegetal y características físicas como alta infiltración, atribuida a los altos valores de porosidad total encontrados, influenciados por la textura relativamente más liviana, y también por su menor densidad aparente, que permiten regular la escorrentía que incide en forma directa sobre la pérdida de suelo.

En las parcelas de suelo desnudo se registró un arrastre de sedimentos (en seis meses) de 58.93 Kg, mientras que en las parcelas en proceso de sucesión natural fue 14.14 Kg en el mismo tiempo; estos valores se extrapolaron a ton/ha/año obteniéndose 7.852 ton/ha/año para el tratamiento de suelo desnudo y 1.886 ton/ha/año en tratamiento de cobertura vegetal en proceso de sucesión natural.

INTRODUCCIÓN

La degradación de los recursos suelo y agua, son percibidos como uno de los problemas de mas trascendencia en los trópicos. Existen áreas extensas de tierras, que están siendo sometidas a la degradación en forma irreversible, donde procesos degradativos, están afectando estos sistemas naturales así: erosión acelerada, desertificación, compactación y endurecimiento, acidificación, disminución en el contenido de materia orgánica, disminución de la biodiversidad y agotamiento de la fertilidad natural del suelo.

Las altas pérdidas de productividad de los suelos de la zona andina por procesos degradativos como la erosión hídrica, han conducido a la realización de estudios de suelos y aguas para cuantificarla, con el fin de predecir la erosión tolerable bajo determinadas condiciones (lluvia, suelos, pendiente, cultivos) lo que facilitaría la selección de prácticas integrales de conservación (prácticas agronómicas, procesos de construcción, conducción de aguas de escorrentía entre otras), para diferentes usos del suelo y su protección, a nivel de predios y cuencas hidrográficas.

Dadas las propiedades físicas de los suelos andicos como alta porosidad y estructura muy estable deberían ser poco erosionables. Sin embargo hay fuertes evidencias de que derivado de la acelerada deforestación de las tierras, y de un uso para cultivos anuales que exigen una frecuente rotulación de la superficie, se presentan crecientes procesos de erosión (29).

La erosión hídrica del suelo es un proceso en el cual la lluvia que cae sobre un terreno desnudo golpea directamente sobre la superficie, eliminando la materia orgánica ligera, fragmentando los agregados del suelo y dejando marcas sobre la superficie. Al no filtrarse el agua, esta se desplaza en forma de escorrentía superficial, llevándose consigo partículas de suelo así como nutrientes presentes en el agua y en el suelo arrastrado.

El nitrógeno y el fósforo son nutrientes esenciales para el normal desarrollo de las plantas, y teniendo en cuenta que estos nutrientes se pierden en el arrastre por el agua de escorrentía, se realizó este estudio acerca del arrastre de nitratos, fosfatos y suelo por acción de la escorrentía superficial en parcelas permanentes en proceso de sucesión natural y suelo desnudo, para establecer el efecto que sobre la escorrentía y el arrastre de suelo tienen la cobertura vegetal en proceso de sucesión natural y el suelo desnudo. Las parcelas permanentes, se ubicaron en el Jardín Botánico Alvaro José Negret, Corregimiento La Rejoja, municipio de Popayán.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La degradación del suelo provoca alteraciones en su nivel de fertilidad y consecuentemente en su capacidad de sostener una agricultura productiva, además esta degradación significa el cambio de una o más de sus propiedades a condiciones inferiores a las originales, por medio de procesos físicos, químicos y biológicos.

La precipitación hace parte de uno de estos procesos y se define como cualquier tipo de agua que cae sobre la tierra, puede ser lluvia, nieve, humedad de niebla, graniza o escarcha. La lluvia tiene efecto a través del impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, que al caer dispersan materiales y modifican la estructura del suelo, al disgregar las partículas y removerlas por salpicadura originando así escorrentía superficial cuando se supera la capacidad de infiltración, por tal motivo se presenta un arrastre de suelo y nutrientes imprescindible y de vital importancia para la productividad vegetal. Dos de los elementos más importantes para las plantas, son el nitrógeno que se emplean en la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos (ADN y ARN) y otras moléculas fundamentales del metabolismo, y el fósforo que es un elemento regulador de la vegetación y, por tanto, un factor de calidad que favorece los periodos vegetativos que son críticos para el rendimiento del cultivo: fecundación, maduración y movimiento de las reservas.

Dada la importancia de estos elementos, en la presente investigación se analizó el arrastre de algunos nutrientes (Nitratos NO_3^- y Fosfatos PO_4^{3-}) y del suelo por acción de la escorrentía superficial en parcelas permanentes en proceso de sucesión natural y suelo desnudo. Para tratar de dar solución a la siguiente pregunta de investigación ¿Cuánto es el arrastre de nitratos, fosfatos y suelo en el agua escurrida por efecto de la escorrentía superficial para el municipio de Popayán?

2. JUSTIFICACIÓN

Los alimentos del mundo provienen en 90% de sistemas agrícolas basados en la tierra, y este porcentaje crece conforme se agotan la pesca y los ecosistemas oceánicos naturales. Proteger y nutrir las tierras de cultivo que son la piedra angular de la producción de alimentos, debe ser la característica central de la sostenibilidad. En todo el mundo la erosión, la formación de sales en la tierra y otros problemas vienen degradando los suelos agrícolas de una manera que socavarán mucho la producción en el futuro. Durante los últimos 40 años, un tercio de las tierras de labranza del mundo (1500 millones de hectáreas) han sido abandonadas por semejante degradación (28).

Los efectos de la erosión hídrica se dejan notar tanto en el sitio donde tienen lugar como fuera de él. La erosión de los suelos agrícolas y forestales reduce la cantidad de materia orgánica y aumenta la cantidad de arcillas. Esto provoca una disminución de la capacidad de retención de agua del suelo, aumentando las condiciones de aridez con un tiempo seco, y la posibilidad de inundaciones cuando el tiempo es lluvioso. Con la erosión se altera la estructura del suelo y bajan las concentraciones de nutrientes, así como la profundidad hasta donde pueden llegar las raíces de las plantas, arruinando de este modo los campos de cultivo. Esta también reduce la diversidad y abundancia de organismos en el suelo, esenciales para la productividad del suelo y la infiltración del agua.

El estudio de la erosión hídrica, es hoy en día de gran importancia al ser un problema ambiental que altera la integridad de los ecosistemas y de los ciclos ecológicos, ocasionando un arrastre de nutrientes esenciales para el crecimiento y desarrollo de las plantas, dentro de estos nutrientes esenciales podemos considerar el fósforo y el nitrógeno. El nitrógeno es el nutriente más importante en el desarrollo de la planta dada su abundancia en las principales biomoléculas de la materia viva, si a esto añadimos que los suelos suelen ser más deficientes en nitrógeno que en cualquier otro elemento, no resulta extraño que sea, junto con el P y el K, el elemento clave en la nutrición mineral.

Las propiedades físicas del suelo, nos permiten conocer los factores que regulan la escorrentía superficial, la cual incide de forma directa en el arrastre de suelo y nutrientes. Estos nutrientes se pierden en solución y adheridos al suelo.

El análisis de parámetros como: pH, conductividad, Nitratos (NO_3^-), Fosfatos (PO_4^{3-}), y mediciones sobre la cantidad de suelo arrastrado por escorrentía superficial, como también algunas propiedades físicas en el suelo (textura, humedad, densidad aparente, densidad real, porosidad total y conductividad hidráulica) permitieron conocer los procesos de arrastre de suelo y nutrientes

(nitratos y fosfatos) en un área determinada e identificar posibles factores topográficos y climatológicos que participen en ello.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar las concentraciones de nitratos NO_3^- y fosfatos PO_4^{-3} , que son arrastradas por escorrentía superficial en parcelas en proceso de sucesión natural y suelo desnudo.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ❖ Evaluar el contenido de nitratos y fosfatos en el agua de escorrentía de cada parcela, para determinar el efecto que se genera con la vegetación en proceso de sucesión natural y suelo desnudo.
- ❖ Determinar la cantidad de suelo arrastrado por acción de la escorrentía superficial en parcelas en proceso de sucesión natural y suelo desnudo.
- ❖ Relacionar las propiedades físicas del suelo (textura, humedad, densidad aparente, densidad real, porosidad total, conductividad hidráulica) con la pérdida de suelo por escorrentía superficial en la vegetación en proceso de sucesión natural y suelo desnudo.
- ❖ Identificar las plantas que crecen en las parcelas en proceso de sucesión natural.

4. HIPÓTESIS

Los suelos de la meseta de Popayán, clasificados como suelos andicos, por sus propiedades físicas y químicas, además de características fisiográficas con pendientes pronunciadas, alta pluviosidad, diversas formas de cobertura vegetal y diferentes prácticas agrícolas propician el incremento de las tasas de erosión y el desplazamiento de iones (nitrato y fosfato) importantes para la fisiología de las plantas.

5. MARCO TEORICO

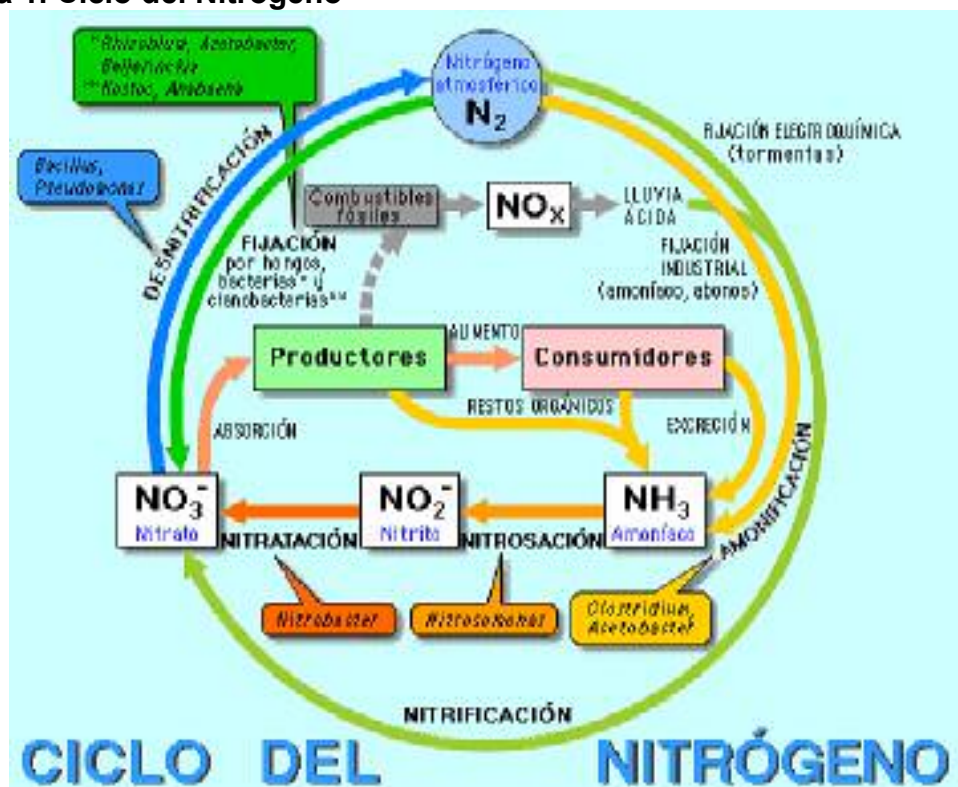
5.1 DEFINICIÓN DE TERMINOS

5.1.1 CICLO DEL NITRÓGENO

El nitrógeno es el constituyente esencial de las proteínas, que son un componente básico de todos los seres vivos. Se encuentra en la naturaleza en forma de sales nitradas, aminas, aminoácidos, ácidos nucleicos, fosfolípidos entre otras. Su reserva fundamental es la atmósfera (79% en volumen), en donde se encuentra en forma de N_2 , pero esta molécula no puede ser utilizada directamente por la mayoría de los seres vivos.

El nitrógeno en el suelo está sujeto a un conjunto de transformaciones y procesos de transporte que se denomina "Ciclo de Nitrógeno" (Figura 1).

Figura 1. Ciclo del Nitrógeno



Fuente: Proyecto biosfera. Ministerio de educación y ciencia Disponible en Internet: <http://iris.cnice.mecd.es/biosfera/alumno/2bachillerato/Fisiologia_celular/contenidos11.htm>

5.1.1.1 Fijación del nitrógeno

Esta fijación ocurre de dos modos. El primero es una fijación por acción química de alta energía. La radiación cósmica, las estelas de los meteoritos y los relámpagos proporcionan la alta energía necesaria para combinar el nitrógeno con el oxígeno y con el agua. El amoníaco y los nitratos resultantes son llevados hacia la superficie de la tierra con el agua lluvia. El segundo método es biológico, se lleva a cabo por las bacterias fijadoras de nitrógeno, algunas de ellas simbióticas que viven en asociación con las leguminosas y con plantas no leguminosas a las que producen nódulos en las raíces, por bacterias de vida libre aeróbicas y por cianobacterias. La fijación divide al nitrógeno molecular (N_2) en dos átomos de N libre que se combinan con el hidrógeno para formar dos moléculas de amoníaco (NH_3) (36).

5.1.1.2 Amonificación

Gran parte del nitrógeno del suelo proviene de las descomposiciones de la materia orgánica y por lo tanto deriva de compuestos orgánicos complejos (proteínas, aminoácidos, etc). Los organismos que viven en el suelo (bacterias y hongos) rompen los aminoácidos de la materia orgánica muerta para obtener energía liberando los grupos amino en forma de amoníaco (NH_3), o amonio (NH_4^+). Al realizarse la digestión enzimática, el nitrógeno puede seguir dos direcciones posibles: a) Incorporarse en las estructuras celulares de los microorganismos del suelo y formar parte de nuevo del complejo proteico; b) Ser transformado en productos simples que aparecen casi siempre en forma amónica. A este proceso en concreto se le llama amonificación (13).

5.1.1.3 Nitrificación

Nitrificación es el proceso por el cual el N es transformado por la acción de los microorganismos de la forma amoniacal (NH_4^+) a nitritos (NO_2^-) y posteriormente a nitratos (NO_3^-). El proceso es de gran importancia agrícola pues, aunque algunas plantas pueden tomar nitrógeno amoniacal, para muchas la forma más disponible es la de nitrato (27). Dos grupos de microorganismos están implicados en este proceso: las bacterias del género *Nitrosomonas* que utilizan el amoníaco del suelo como su única fuente de energía y promueven su transformación a nitritos y agua. Y las del género *Nitrobacter*, que toman posteriormente los nitritos transformándolos en nitratos (36).

Normalmente el nitrito se transforma en nitrato con mayor rapidez que se produce, los niveles de nitrito en los suelos suelen ser muy bajos en comparación con los de nitrato.

5.1.1.4 Desnitrificación

El nitrógeno en forma de nitrato puede transformarse mediante el proceso de desnitrificación en nitrógeno molecular gaseoso (N_2) o en óxidos de nitrógeno, que pasan a la atmósfera, por acción de las bacterias desnitrificantes, representadas por numerosas especies del género *Pseudomonas* y también por el *Thiobacillus denitrificans*. Este fenómeno se debe a que, en condiciones de mucha humedad en el suelo, la falta de oxígeno obliga a ciertos microorganismos a emplear nitrato en vez de oxígeno en su respiración.

5.1.1.5 Absorción de nitrógeno por la planta

La absorción de N por la planta constituye una de las partes más importantes del ciclo del nitrógeno en los suelos agrícolas. Por lo tanto cualquier factor que aumente el contenido de materia orgánica descompuesta o estimule la actividad de los microorganismos del suelo, contribuirá a facilitar la transformación del nitrógeno orgánico en nitrato (5).

En la planta, el N se distribuye en tres grupos: más del 50% se halla en compuestos de elevado peso molecular (proteínas y ácidos nucleicos); el resto en forma de nitrógeno orgánico soluble (aminoácidos, aminas, amidas...) y N inorgánico (principalmente iones nitrato y amonio). Su contenido en el total del peso seco de la planta oscila entre el 1.5 y el 5% (4).

5.1.2 CICLO DEL FÓSFORO

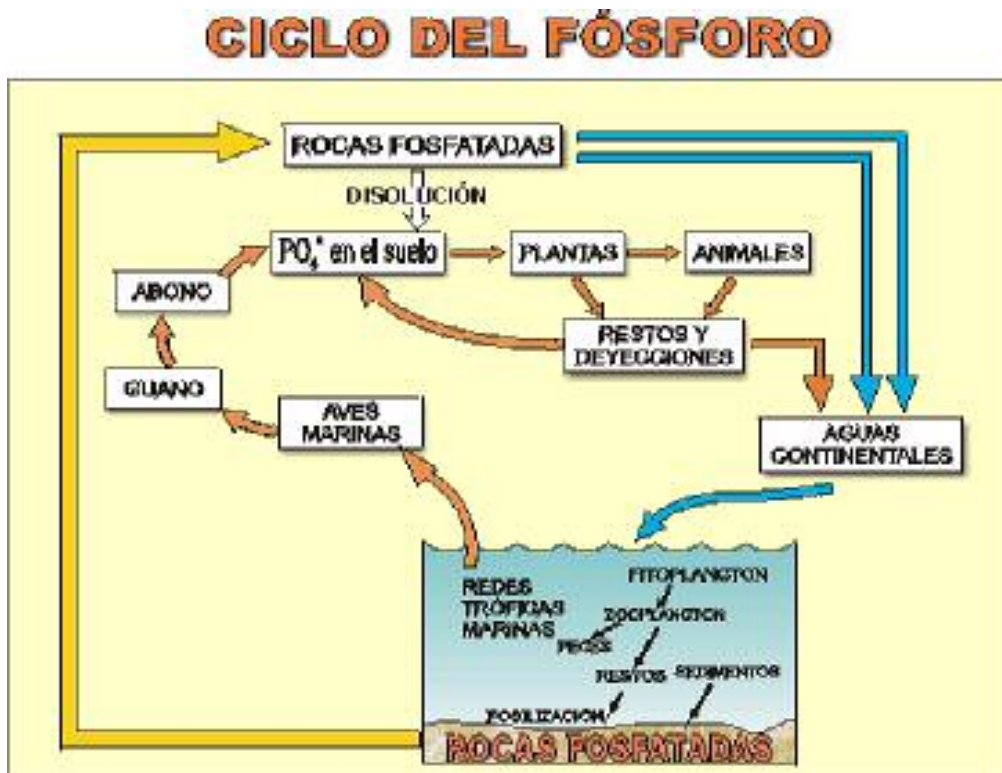
Aunque el fósforo en la materia viva es relativamente escaso, el papel que desempeña es vital. Forma parte de los ácidos nucleicos, sustancias que almacenan y traducen el código genético, son ricos en fósforo. Muchas sustancias intermedias en la fotosíntesis y en la respiración celular están combinadas con fósforo, y los átomos de fósforo proporcionan la base para la formación de los enlaces de alto contenido de energía del ATP, que a su vez desempeña el papel de intercambiador de la energía, tanto en la fotosíntesis como en la respiración celular. Se encuentra en pequeñas cantidades en las plantas, en proporciones de un 0,2%, aproximadamente.

El P, luego del nitrógeno, es el macronutriente que en mayor medida limita el rendimiento de los cultivos se lo considera un nutriente esencial para las plantas. Es catalogado como elemento doblemente crítico, debido a las bajas concentraciones en que se encuentra en el suelo y a los fenómenos de retención a que es sometido, bien sea por los sesquioxidos de hierro y aluminio o por los materiales de tipo amorfo. Es un hecho bien conocido que muchos suelos tropicales tienen una capacidad extrema para inmovilizar el fósforo (Sánchez, 1976 citado en (26)).

Su reserva fundamental en la naturaleza es la corteza terrestre. Este elemento se encuentra en varios minerales de las rocas y los suelos en forma del ion inorgánico como $H_2 PO_4^-$ o como $H PO_4^{=}$. Las formas orgánicas se hallan en el humus del suelo, en diferentes niveles de estabilización.

En el proceso meteorización de las rocas, se libera fosfato y otros iones. El fosfato se disuelve en agua pero no pasa al aire. Las plantas lo absorben del suelo de su solución acuosa y lo enlazan a compuestos orgánicos entonces recibe el nombre de fosfato orgánico, que al avanzar por las cadenas alimentarias se transfiere al resto del ecosistema. Otra parte del fósforo con facilidad es arrastrado por las aguas y llega al mar donde se sedimenta en el fondo y forma rocas que tardarán millones de años en volver a emerger y liberar de nuevo las sales de fósforo. El fósforo también es absorbido por el plancton que, a su vez, es comido por organismos filtradores de plancton, como algunas especies de peces. Cuando estos peces son comidos por aves que tienen sus nidos en tierra, devuelven parte del fósforo en las heces a tierra (Figura 2).

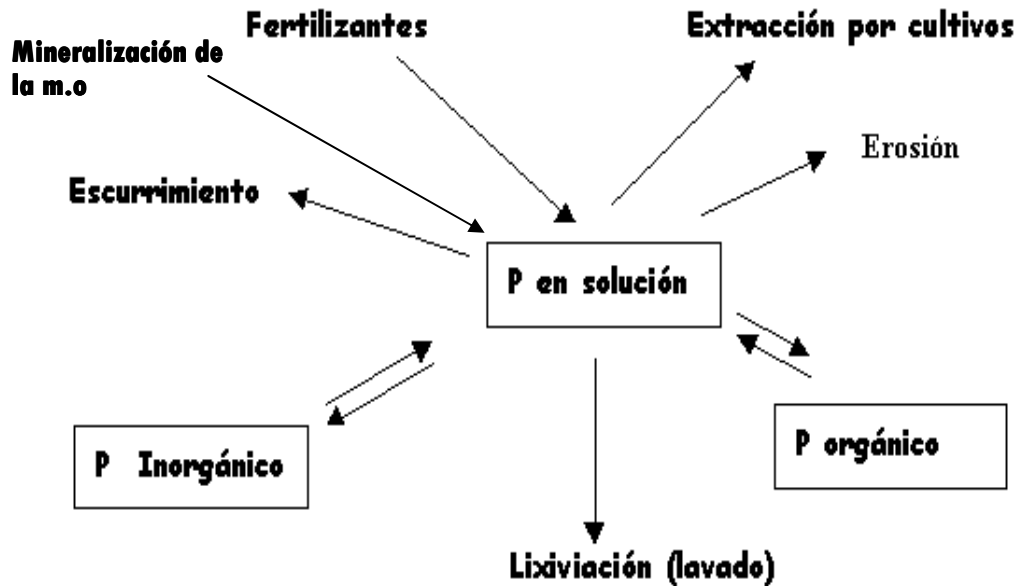
Figura 2. Ciclo del Fósforo



Fuente: Lenntech Agua residual & purificación del aire Holding B.V. Rotterdamseweg 402 M2629 HH Delft. Disponible en Internet:<<http://www.lenntech.com/espanol/ciclo-fosforo.htm>>

5.1.2.1 Ciclo global del fósforo.

Figura 3. Ciclo global del P en el sistema suelo-planta



Fuente: Equipo del Proyecto Fertilizar - INTA Pergamino. Movilidad del Fósforo en el Suelo. Disponible en internet: <URL:<http://www.fertilizar.org.ar/articulos/Movilidad%20del%20Fosforo%20en%20el%20Suelo.htm>>

Como se desprende de la observación del ciclo global del P, las entradas al sistema provienen del agregado de fertilizantes fosfatados y de la mineralización de la materia orgánica, mientras que las salidas son por extracción en los granos cosechados; erosión; esguerramiento, lixiviación. A medida que el P disponible en la solución del suelo es absorbido por las plantas, es repuesto a partir de la mineralización del humus, de las fracciones de las arcillas y en forma mucho más lenta, desde la mineralogía primaria. Este reaprovisionamiento de P hacia la solución del suelo, se realiza mediante un equilibrio químico dinámico. Por todo lo mencionado previamente, en cultivos productivos sin fertilización, la disponibilidad de P se va reduciendo en forma progresiva, a diferencia de nutrientes como el N, en donde, además del agregado de N vía fertilizante, puede existir fijación biológica del N atmosférico a través de la simbiosis entre ciertas bacterias (por ejemplo, del género *Rhizobium*) y las leguminosas (11).

5.1.2.2 Absorción del fósforo por la planta.

El fósforo es disponible para la planta como ion fosfato y se absorbe preferiblemente como H_2PO_4^- en suelos con un pH inferior a 7 y como un anión divalente HPO_4^{2-} en suelos básicos. En contraste con el nitrógeno, el fósforo no

se encuentra en forma reducida en la planta, sino que permanece como fosfato ya sea en forma libre o como un compuesto orgánico.

El fosfato se redistribuye fácilmente en la mayoría de las plantas de un órgano a otro, acumulándose en las hojas jóvenes y en las flores y semillas en desarrollo; en consecuencia los síntomas de deficiencia se presentan primero en las hojas adultas.

5.2 EROSIÓN

5.2.1 DEFINICIONES

Es una pérdida gradual del material que constituye el suelo, al ir siendo arrastradas las partículas (disgregadas, arrancadas y transportadas), a medida que van quedando en la superficie (30).

La erosión es la remoción de partículas por el viento y el agua, con una velocidad mayor que la de formación de suelo nuevo (el suelo se forma a una tasa aproximada de 1 tonelada métrica por hectárea y año).

La pérdida de las capas superiores ricas en humus, con una notable capacidad absorbente y de estructura granular, deja al descubierto las capas inferiores pobres en humus, menos absorbentes, más inestables y fácilmente erosionables. Si el subsuelo está constituido por arcillas, absorbe el agua tan lentamente que las lluvias intensas provocan una fuerte erosión y una rápida escorrentía superficial (36).

Erosión geológica es el desgaste natural que sufre la superficie terrestre sin la intervención antrópica, es conocida también como erosión normal, considerándose como un proceso natural en el que la pérdida de material es restituido por la creación o génesis de un nuevo suelo (21).

5.2.2 CLASES DE EROSIÓN DEL SUELO

5.2.2.1 Erosión hídrica

El proceso erosivo es ocasionado por acción de fuerzas hidráulicas. Por lo general la lluvia llega a la superficie del suelo, parte de ella se infiltra y parte de ella escurre sobre la superficie. La lluvia actúa sobre las partículas, produciendo desprendimiento, transporte y posterior depósito de materiales de suelo o roca por acción de la fuerza del agua en movimiento. Atendiendo a la forma como tiene lugar la erosión hídrica, cabe distinguir procesos erosión por salpicadura, erosión laminar, erosión por arroyadas, cárcavas y barrancos.

5.2.2.2 Erosión eólica

Es el proceso erosivo del suelo producido por acción de la energía del viento sobre las partículas del suelo. Dicha energía se manifiesta por mecanismos tales como la saltación, rodamientos y suspensión. El viento arranca finas partículas de polvo y las transporta consigo en formas de nubes de polvo.

Tanto la erosión eólica como la hídrica dejan la tierra yerma, estéril. En todo el mundo, se destruyen y abandonan anualmente unos 12 millones de hectáreas de tierras cultivables a causa de la gestión inadecuada del suelo. Estos terrenos suelen quedar tan degradados que la vegetación natural muy raramente consigue restablecerse en ellos (36).

5.3 PÉRDIDA DE NUTRIENTES DEL SUELO POR LA EROSIÓN

Según Baker y Laflen (1983) (citado en (31)) la pérdida de nutrientes puede ocurrir de tres maneras:

1. Por percolación en el perfil del suelo
2. En solución en el agua de escorrentía
3. Absorbidos a los sedimentos arrastrados por el agua de escorrentía.

Estos autores mencionan también que la cantidad, persistencia, ubicación en el perfil del suelo y el grado de interacción del suelo (adsorción) son los factores más importantes que determinan la concentración de un nutriente en el sedimento o en el agua.

La cantidad existente en el perfil del suelo influye directamente la concentración de nutrientes en el sedimento y en el agua. La persistencia de un nutriente afecta la cantidad de este nutriente en el perfil del suelo. Las transformaciones químicas, físicas y la extracción por las plantas, reducen la concentración actual y, por lo tanto, las posibles pérdidas en el sedimento o en el agua.

La adsorción del suelo es otro factor importante de la determinación de la concentración de nutrientes en el agua y en el sedimento, debido a que existe un equilibrio entre la concentración de nutrientes en el suelo y en el agua. Para la mayoría de los nutrientes existe una constante K (constante de equilibrio o coeficiente de adsorción), que es la relación entre la concentración del nutriente asociado al suelo o sedimento y la concentración del nutriente disuelto en el agua en contacto con el suelo.

Aunque las propiedades del suelo tales como pH, textura y materia orgánica puedan afectar la K, los valores de K están dados mucho más en función del

nutriente. Por esta razón los nutrientes pueden ser agrupados en tres clases, de acuerdo a los valores de K:

Clase 1: $K > 100$ (nutriente con alto K): los nutrientes se pierden, en principio, con el sedimento.

Clase 2: $K < 0,1$ (K con valores extremadamente bajos): los nutrientes se pierden por drenaje subsuperficial.

Clase 3: K intermedio entre las otras dos clases: los nutrientes se pierden, en principio, en solución en el agua de escorrentía superficial.

Los nutrientes de la clase 1 incluyen compuestos que son adsorbidos por el suelo o tienen baja solubilidad. El nitrógeno orgánico total y el fósforo están en esta clase.

El nutriente más importante que se pierde por percolación es el nitrógeno nítrico que tiene un valor bajo de K. Las pérdidas por escorrentía superficial comúnmente son bajas debido a la baja tasa de infiltración cuando se inicia la precipitación y a la lixiviación de nitrógeno nítrico no absorbido hacia abajo de la capa arable. En el caso de suelos con infiltración limitada o húmedos, en los cuales la tasa de infiltración es baja, las pérdidas de nitrógeno nítrico por escorrentía superficial pueden ser mayores que por percolación profunda.

El nitrógeno amoniacal y el potasio intercambiable se sitúan en la clase intermedia (clase 2).

5.4 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS

5.4.1 Textura del suelo

La textura de un suelo hace referencia a la proporción relativa en que se encuentra, en una masa de suelo varios grupos de granos individuales asociados por tamaño. Se refiere específicamente a las proporciones relativas de las partículas o fracciones de arena, limo y arcilla en la tierra fina del suelo, es decir en la tierra tamizada y con diámetro inferior a 2 mm (24).

5.4.2 Humedad

La humedad de un suelo se refiere al contenido de agua con relación al peso o volumen de la masa de suelo. La humedad gravimétrica es la forma más común de expresar la humedad del suelo y se define como la relación masa del agua y masa de los sólidos del suelo (24).

5.4.3 Densidad aparente

La densidad aparente se expresa como la relación entre la masa seca de las partículas del suelo (a 105 °C por 24 h) y un volumen de suelo conocido que incluye el espacio poroso (24).

5.4.4 Densidad real

La densidad real se define como la relación entre la masa total de los sólidos y el volumen total de las partículas sólidas del suelo, sin incluir el espacio poroso (24).

5.4.5 Porosidad total

Mediante la diferencia entre el valor de la densidad real y la densidad aparente se obtiene la porosidad total; esta equivale a la suma de la porosidad no capilar más la porosidad capilar; la primera esta relacionada con la aireación (intercambio gaseoso) y la segunda con la retención de humedad (24).

5.4.6 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica se define como la velocidad de filtración que se presenta en un medio saturado, dependiendo tanto de las características del suelo como del fluido (24).

6. ZONA DE ESTUDIO

6.1 ASPECTOS BIOFÍSICOS

6.1.1 Ubicación geográfica y superficie. El trabajo de investigación se realizó en el corregimiento La Rejoja localizado a 18 Km al occidente de la Ciudad de Popayán, municipio de Popayán, ubicado en el Sur-Occidente de Colombia y en el Nor-Oriente del Departamento del Cauca. Se localiza entre lo 2° 27" de latitud Norte y 76° 37" de longitud desde el meridiano de Greenwich (figura 4).

El corregimiento de La Rejoja limita por el Norte con el corregimiento de Cajibío, por el Este con el corregimiento Las Piedras, por el Sur con el corregimiento San Bernardino y por el Oeste con el corregimiento Santa Rosa.

El corregimiento La Rejoja tiene una extensión de 2312.50 has, y se encuentra entre los 1600 y 1800 m.s.n.m.

6.1.2 Núcleos poblados. La cabecera del corregimiento corresponde al caserío La Rejoja, lo conforman las veredas de La Rejoja y Villanueva (1).

6.1.3. Precipitación. A partir de los datos acumulados en la estación climatológica del Aeropuerto "Guillermo León Valencia" se identificó que el patrón de distribución de la precipitación en el municipio de Popayán presenta una variación trimestral. El período con mayor concentración de lluvias se inicia en octubre y concluye en diciembre, con una precipitación de 651.5 mm que equivalen al 41.20% del total anual de la precipitación. El mes con mayor pluviosidad es octubre con 273.6 mm que equivale al 17.30%. El segundo período más lluvioso va de marzo a mayo, con un registro de 482.3 mm de precipitación, que equivale al 30.50% del total anual de precipitación.

La época de menos captación de lluvia abarca los meses de junio, julio y agosto, con un total de 108.1 mm de precipitación, lo que equivale al 6.83% del total anual. El mes que presenta menos precipitación es agosto con 1.4mm que equivale al 0.088%. Con un total de precipitación anual promedio de 2200mm (16).

6.1.4 Temperatura. La variación de la temperatura, en el municipio de Popayán, oscila entre los 18.2 °C y los 19.3 °C. La temperatura mínima se registra en el mes de julio y agosto y corresponde a 11.5 °C y la temperatura máxima es de 25.3 °C y se presenta en el mes de agosto.

6.1.5 Humedad relativa. La humedad relativa oscila entre 69 y 82%. La variación anual de estos datos, esta relacionada con la presencia en mayor o menor grado de la precipitación, así como también de otros factores meteorológicos, como vientos, nubosidad, temperatura y evapotranspiración, al igual que la cobertura vegetal presente.

6.1.6 Brillo solar. El brillo solar registra un rango entre 106 y 180 horas mensuales, presentándose mayor concentración del mes de Julio al mes de Agosto con un valor máximo de 180 horas mensuales en Julio. Entre los meses de Septiembre y Noviembre el fenómeno disminuye igual que entre Febrero y Octubre, registrando un valor de 106 horas mensuales (2).

6.1.7 Vientos. En el mes de Agosto se presentan remolinos de fuerte intensidad, ocasionados por corrientes cálidas provenientes del Valle del Patía y las corrientes húmedas de la costa Pacífico (39).

6.1.8 Zonas de vida. De acuerdo al sistema de formaciones vegetales de Holdridge, el corregimiento de La Rejota se encuentra en la zona de vida de bosque muy húmedo premontano (bmh-PM), esta formación presenta como límites climáticos una temperatura media entre 18 y 24°C y un promedio anual de lluvias entre 2000 y 4000 mm (20).

6.1.9 Geología. El municipio se extiende bajo la denominada formación Popayán, situada sobre depósitos fluviales alterados y una serie de rocas piroclásticas, flujos de lodo y cenizas volcánicas provenientes de la Cordillera Central, que además esta constituida por rocas basálticas, formaciones sedimentarias oceánicas y rocas metamórficas de bajo grado del Cretáceo, con esporádicas intrusiones de rocas de cuarzo dioríticas del Terciario. Los depósitos Cuaternarios más notables están ubicados en el Valle del Cauca, en la cuenca del Patía y en la planicie disectada de la formación Popayán. Todos ellos están asociados a la depresión intercordillerana del Cauca – Patía.

La edad de la formación Popayán se asigna al Plioceno-Holoceno. La composición de las rocas y depósitos de esta formación varia desde alcalina-feldespática-igolítica hasta calcoalcalina andesítica (37).

6.1.10 Geomorfología. La intensiva actividad volcánica de la Cordillera Central, sumados con los fuertes movimientos técnicos ocurridos en todo el departamento configuran un intrincado sistema montañoso, cuyas ramificaciones, depresiones y valles intermedios determinan las diferentes unidades geomorfológicas encontradas en el Municipio como son montañas, colinas, formas de pie de montaña, planos lacustres y superficies aluviales (39).

6.1.11 Suelos: En Municipio de Popayán los suelos están formados a partir de cenizas volcánicas (Andosoles háplicos – Anh), algunos de ellos con altos contenidos de materia orgánica (Andosoles úmbricos Anu) (19). Los Andisoles se presentan más generalmente en áreas montañosas y pendientes (20 – 50%) que faciliten el drenaje, a alturas (> 700 msnm) y climas (húmedos a sub – húmedo) que mantengan temperaturas frescas y un régimen hídrico de carácter údico, lo cual a su vez permite la acumulación de materia orgánica (MO) y la formación de complejos alofano-MO muy estables (27).

6.2 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se realizó en el Jardín Botánico Alvaro José Negret ubicado en el corregimiento La Rejoja municipio de Popayán (Figura 5). Se localiza entre lo 2° 31' 13 de latitud Norte y 76° 35' 46 de longitud Oeste, a una altura de 1790 msnm.

Figura 4. Localización de la zona de estudio, Jardín Botánico Álvaro José Negret, Corregimiento La Rejoa

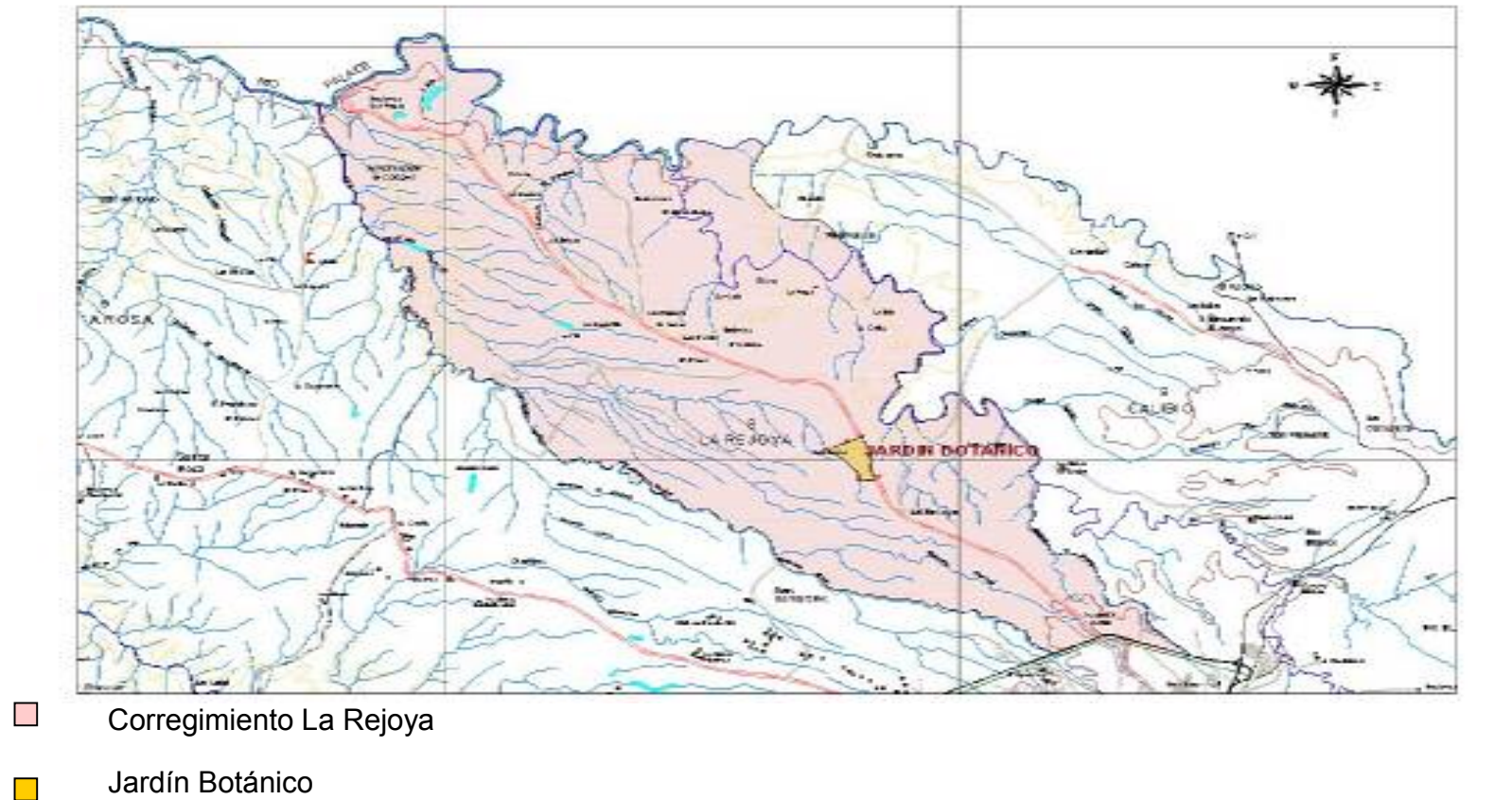


Figura 5. Plano distribución del Jardín Botánico Álvaro José Negret



7. ANTECEDENTES

Investigaciones realizadas fuera de Colombia que se tomaron como referente para la realización de este trabajo, dada su similaridad en las variables evaluadas, fueron las de Cervantes y Vahrson (1992) y La Torre B (1985).

Cervantes y Vahrson, trabajaron sobre las características físicas y pérdida de nutrimentos de las parcelas de erosión de Cerbatana de Puriscal, Costa Rica. Los datos obtenidos muestran algunas relaciones entre las características físicas y bases del suelo. La mayor escorrentía la mostró la parcela de pasto. La escorrentía fue asociada con las pérdidas de nitratos en las aguas superficiales, las cuales fueron mayores en las parcelas de café con sombra. Las menores escorrentías se presentaron en las parcelas de café sin sombra, sin embargo esto se asoció a diferencias en las características físicas de las parcelas.

La Torre, B, en la selva alta del Perú, en San Ramón-Provincia de Chanchamayo, realizó un estudio de la erosión hídrica en un Entisol, evaluando el efecto de diferentes sistemas de cultivo en la pérdida del suelo, agua y nutrientes mediante el uso de parcelas de escorrentía. Los tratamientos en estudio fueron: suelo desnudo, rotación de maíz-frijol-papa-maní-yuca, sin y con fertilización; la misma rotación con "mulch" y fertilización; y la rotación de cultivos asociados (yuca+frijol)-(maíz+papa) en dos épocas de siembra. Se registró mayores pérdidas de suelo en el tratamiento de suelo desnudo con 45.3 ton/ha, y las menores al tratamiento con mulch y fertilización con 3.8 ton/ha. Los nutrientes que se perdieron en mayor cantidad en el suelo erosionado y en el agua de escorrentía fueron el nitrógeno y el calcio. El nitrógeno vario entre 5.8 y 51.9 Kg/ha para el tratamiento de "mulch" y suelo desnudo respectivamente, y el calcio oscilo entre 4.8 y 43.7 Kg/ha para los mismos tratamientos.

Para Colombia se tomaron los siguientes referentes: Díaz y Mendoza (1989), Escobar, Amezcuita y Navas (1993) y Restrepo, Amezcuita y Navas (1991), Díaz y Mendoza (1989), en un bosque alto andino de la región de Monserrate, Cundinamarca, donde se investigo el flujo de biogeoelementos a través de la dinámica hídrica, del aporte de hojarasca y de la descomposición foliar, así como las reservas de elementos en el mantillo y suelo mineral y su concentración en la vegetación. A partir de los análisis químicos de las muestras recolectadas se establecieron las cantidades de N, P, K, Ca, Mg que ingresaron al ecosistema, su flujo interno y su egreso de la microcuenca en estudio. Los resultados de la investigación demuestran que el bosque alto andino estudiado es un ecosistema frágil al presentar escasa reservas de biogeoelementos en el suelo mineral, especialmente de P y K, las cuales se hallan acumuladas principalmente a nivel

del mantillo. En cuanto al flujo de biogeoelementos por agua, el análisis de la microcuenca de la Quebrada El Granizo, demostró que el sistema está perdiendo Mg, Na y K y acumulando N, Ca y P según el índice de ingreso/egreso.

Escobar, Amezcuita y Navas (1993), evaluaron las pérdidas de suelo y agua de escorrentía en condiciones de lluvia natural, en cuatro sistemas de manejo de suelo (bosque natural, rastrojo, cobertura muerta y suelo desnudo), en un ultisol originado de material arcillo-limoso, en el Centro de Investigaciones "Macagual" del Instituto Colombiano Agropecuario. Los resultados de 12 años (1978 – 1989) señalan que en las áreas experimentales de bosque y rastrojo, el 95% de la precipitación anual se infiltra y el 5% (160 mm) escurre. En ellos las pérdidas de suelo fueron inferiores a 1 ton/ha/año. En la unidad experimental con cobertura muerta la escorrentía fue de 15% (423 mm) y las pérdidas de suelo de aproximadamente 1 ton/ha/año. En la unidad de suelo desnudo se presentaron las mayores escorrentías, 41% del total de la precipitación y las pérdidas de suelo, fueron del orden de 27.6 ton/ha/año.

Restrepo, Amezcuita y Navas (1991), realizaron un trabajo sobre la dinámica del proceso de erosión en algunos suelo del piedemonte llanero, durante 3 años en Villavicencio, utilizando parcelas de escorrentía. En las pérdidas de N, P y K solo fue significativa la de N, con 33.3 y 70.9 Kg/ha para los suelos de clase III (francos) y IV (franco arenosos) respectivamente. Los sedimentos en la suspensión de la escorrentía contribuyeron con un 38% y un 53% de la erosión total para suelos franco arenosos y francos respectivamente. La fertilidad es muy baja tanto para los erodados gruesos como para el suelo a una profundidad de 5mm.

Para el departamento del Cauca se encontró registro de dos trabajos Salazar (1995) y Ruppenthal (1995), el primero realizado por Salazar, en un relicto de bosque con poca intervención antrópica en la microcuenca de la quebrada Arrayanales, cuenca del Río Las Piedras, Municipio de Popayán, con el fin de comparar iones de Calcio, Nitrito, Nitrato, Sulfato y Fosfato en muestras tomadas de precipitación, "throughfall" (paso de la lluvia a través del follaje) y escorrentía superficial, así como el volumen de agua recogido y el peso del sedimento arrastrado por la escorrentía en un área de 120 m².

El segundo trabajo realizado por Ruppenthal (1995), en Mondomo y en Santander de Quilichao Departamento del Cauca, donde se realizaron ensayos de erosión en parcelas permanentes con pendientes uniformes en sistemas de producción de yuca, asociación con leguminosas de grano y aplicación de mulch. Se registraron concentraciones de K y Mg en la escorrentía de los sistemas de yuca fueron más altas y de P más bajas que en la escorrentía de los suelos desnudos. Por lo tanto el autor concluye que los suelos erodados de la región pueden contribuir sustancialmente a la eutroficación de las aguas.

8. METODOLOGÍA

8.1 CONSTRUCCIÓN DE LAS PARCELAS PERMANENTES

8.1.1 Parcelas experimentales

Las parcelas de escorrentía que fueron diseñadas para la realización del experimento presentan bordes en la parte superior y en los lados, con la finalidad de impedir el ingreso de agua de escorrentía procedente de otras áreas diferentes de la parcela. Los bordes de las parcelas miden 10 m de largo por 5 m de ancho y se construyeron con muros de concreto, los cuales se enterraron 20 cm sobresaliendo aproximadamente 15 cm de la superficie (Figura 6).

Los tratamientos evaluados fueron: vegetación en proceso de sucesión natural y suelo desnudo, con tres parcelas cada tratamiento.

Los tratamientos evaluados se encontraban en pendientes uniformes que oscilan entre 20 y 25 %.

8.1.2 Canal colector

En el extremo inferior las parcelas tienen un sistema de recolección del agua de escurrimiento y del sedimento removido por la erosión hídrica, que esta constituido por un canal colector, que se construyo en ladrillo y cemento con unas dimensiones de 5 m de largo, 30 cm de ancho y 10 cm de alto, además presentó un desagüe para transportar el agua y el sedimento hacia los colectores de escorrentía (Figura 6).

8.1.3 Colectores

Conectados al canal colector por medio de un tubo de PVC de 4' se ubicó un colector de polietileno (capacidad 130L), que recogió sedimentos y agua (Figura 7).

8.2 MÉTODOS DE MUESTREO

8.2.1 Pluviometria

Los datos de precipitación, se obtuvieron por medio de pluviómetros artesanales (figura 8), se instalaron dos pluviómetros por cada parcela, doce en total.

Figura 6. Parcela de escorrentía



Figura 7. Colector de escorrentía



Figura 8. Pluviómetro artesanal



8.2.2 Evaluación inicial de las parcelas experimentales

Después de instaladas las parcelas experimentales, se espero un mes para iniciar el estudio, porque las actividades de laboreo removieron el suelo y esto podía afectar la investigación, luego se midieron algunas propiedades físicas del suelo como: textura, humedad, densidad aparente, densidad real, porosidad total y conductividad hidráulica.

8.2.3 Toma de muestras

Las muestras de agua de escorrentía y de sedimentos presentes en los colectores se tomaron al día siguiente de cada precipitación, durante un período de seis meses comprendido entre marzo y agosto de 2006.

En campo se llevaron registros del volumen de agua encontrada en los pluviómetros y en los colectores, de los colectores se tomaron muestras compuestas (agua y sedimento) de 1000 ml para el análisis de sedimentos y de contenido de nitratos y fosfatos en el agua de escorrentía.

Las muestras de suelo se tomaron de dos formas alteradas y sin alterar, dependiendo de los requerimientos de las pruebas a realizar. Las muestras sin alterar se tomaron hasta una profundidad de 20 cm utilizando cilindros metálicos de 5 cm de alto por 2,5 cm de radio. Se taparon los dos extremos del cilindro con

tapas metálicas y se sellaron con cinta, además se marcaron con una flecha para conocer la direccionalidad.

Las muestras alteradas se tomaron por medio de una pala, se cavó un hoyo en forma de V, de unos 20 cm de profundidad, se cortó una rebanada de uno de los lados y la parte central de la rebanada se pasó a una bolsa de polietileno despreciando los bordes (32).

Todas las muestras tanto de agua como de suelo, fueron rotuladas con código, fecha y hora de recolección. Además las muestras de agua se guardaron en una nevera de icopor para prevenir el paso de la luz, la cual podría afectar las muestras. Posteriormente se almacenaron en un congelador en el laboratorio del Grupo de Estudios Ambientales para sus respectivos análisis.

8.3 MÉTODOS DE LABORATORIO

8.3.1 Método de determinación de Nitratos NO_3^-

Este análisis se realizó mediante la técnica del test selectivo en cubetas para nitratos en Spectroquant con el método No 14773. En la determinación de la absorbancia se utilizó como equipo un Spectroquant, (MERCK NOVA 60) y para la lectura de nitratos una cubeta de 10 mm apropiada para las mediciones de 0.5 – 20.0 mg/L de NO_3^- - N.

El spectroquant utiliza un método basado en el ácido sulfúrico concentrado, con un derivado del ácido benzoico, los iones forman un nitrocompuesto rojo, cuya concentración se determina fotométricamente.

Para llevar a cabo este método se utilizaron las siguientes soluciones:

- NO_3^- - 1A
- NO_3^- - 2A, ácido sulfúrico.

El método consiste en lo siguiente:

- Verter una microcucharada azul de NO_3^- -1A en un tubo de ensayo seco.
- Añadir con la pipeta 5 ml de NO_3^- -2A.
- Agitar intensamente durante un minuto para disolver la sustancia sólida.
- Añadir con la pipeta 1.5 ml de la muestra y mezclar. Atención el tubo se calienta.
- Tiempo de reacción 10 minutos.
- Añadir la solución a la cubeta correspondiente.
- Seleccionar el método con el autoselector.
- Colocar la cubeta en el compartimiento para cubetas y leer (23).

8.3.2 Método de determinación de fosfatos PO_4^{3-}

Este análisis se realizó mediante la técnica del test selectivo en cubetas para fosfatos en Spectroquant con el método No 14848. En la determinación de la absorbancia se utilizó como equipo un Spectroquant, (MERCK NOVA 60) y para la lectura de fosfatos una cubeta de 10 mm apropiada para las mediciones de 0.05 – 5.00 mg/L de PO_4^{3-} - P.

Para llevar a cabo este método se utilizaron las siguientes soluciones:

- P-1A: para preparar 100 ml, se requiere 50 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) 5M, 5 ml de solución de tartrato antimónico potásico ($\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$) 0.008 M, 15 ml de solución de molibdato amónico ($(\text{NH}_4)_6 \text{Mo} - \text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 0.068 M y 30 ml de solución de ácido ascórbico 0.01 M (3).
- P-2A, contiene una solución patrón de fosfatos que se prepara así: pesar 219.5 mg de fosfato diácido de potasio (KH_2PO_4) y llevar con agua destilada a 1.000 ml; 1,00 ml = 50,0 μg de PO_4^{3-} (3).

El método consiste en lo siguiente:

- Comprobar el valor del pH de la muestra, debe estar en un intervalo de pH 0 – 10
- En caso necesario corregir el valor del pH añadiendo gota a gota una solución de ácido sulfúrico H_2SO_4 5N.
- Adicionar con una pipeta 5ml de la muestra en un tubo de ensayo.
- Luego agregar 0.2 ml de P- 1A y mezclar.
- Posteriormente añadir 0.1 ml de P – 2A.
- Agitar intensamente la cubeta para disolver el P-2A (el tiempo de la reacción es 5 minutos)
- Seleccionar en el equipo el método con el autoselector, para este caso el No 14848 y por último se colocará la cubeta en el compartimiento para realizar la lectura (23).

8.3.3 Conductividad

El método para determinar la conductividad en el agua de escorrentía consistió en tomar la muestra de agua (25 ml), filtrada y luego leer la conductividad eléctrica por medio de un conductímetro METRHOHM 660 Conductometer, previamente calibrado con una solución estándar de Cloruro potásico, KCl, 0.01 M y 1M, estas soluciones de referencia estándar, a 25 °C tiene una conductividad de 1.413 $\mu\text{mho/cm}$ y 111.900 $\mu\text{mho/cm}$ respectivamente.

8.3.4 pH

Para determinar el pH se tomó una muestra de agua (25 ml) de escorrentía filtrada. Para establecer el equilibrio entre el electrodo y la muestra se agitó suavemente para asegurar su homogeneidad; luego se procede a medir el pH con el pH – metro (METER TOLEDO. MA 235), al cual previamente se le realizó una calibración con unas soluciones estándar de pH 4, 7 y 10 a una temperatura de 25 °C.

8.3.5 Sedimentos

A las muestras de agua (1000 ml) con sedimentos recolectadas de los tanques de cada parcela, se dejó sedimentar el suelo, luego se seco en una estufa hasta evaporar toda el agua, y por ultimo se peso el suelo seco, este tratamiento se realizó para determinar la cantidad de sedimentos encontrados por litro de agua recolectada, y así finalmente obtener la cantidad de sedimentos que se encontró en los colectores de agua de escorrentía de las parcelas (figura 9).

Figura 9. Muestras de escorrentía sedimentadas



8.4 MÉTODOS DE ANÁLISIS FÍSICO DE SUELOS

8.4.1 Textura del suelo

Para determinar la textura del suelo se utilizó el método de Bouyucos que permite determinar la cantidad de sólidos totales en suspensión por medio del hidrómetro (32).

8.4.2 Humedad

El procedimiento que se utilizó es el siguiente, se pesaron aproximadamente 10 g de suelo en una cápsula que con anterioridad fue pesada, luego se llevó a la estufa durante 24 horas a 105 °C hasta obtener un peso constante y por último se pesó nuevamente (24).

La humedad se determinó por la pérdida de peso de la muestra, por medio de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de humedad} = (P_h - P_s) / P_s - P_c \times 100$$

P_h , peso de la cápsula y la muestra húmeda, g.

P_s , peso de la cápsula y la muestra seca, g.

P_c , peso de la cápsula de porcelana, g.

8.4.3 Densidad aparente

Para determinar este parámetro se utilizó el método del cilindro, consiste esencialmente en tomar una muestra de suelo sin disturbar en un cilindro de un volumen conocido, los cilindros metálicos (acero inoxidable) que se utilizaron para la prueba miden 5 cm de alto por 2.5 cm de radio (24).

Los cálculos se realizaron a partir de la siguiente expresión:

$$D_b = M_{ss} / V_c \qquad V_c = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

Donde: D_b es la densidad aparente, g/cm³; M_{ss} es la masa del suelo seco a 105 °C, g; V_c es el volumen del cilindro donde se toma la muestra de suelo, cm³, r radio del cilindro, cm, h altura del cilindro, cm.

8.4.4 Densidad real

El método del picnómetro es el más empleado para medir la densidad real (figura 10). Se basa en determinar la masa y el volumen de los sólidos del suelo a través de un frasco de un volumen conocido. El picnómetro que se utilizó es de 25 ml con tapa (24).

Para determinar este parámetro se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Densidad Real } D_R = \text{Peso del suelo seco al aire (g)} / \text{Volumen del suelo (cm}^3\text{)}$$

Figura 10. Picnómetros densidad real



8.4.5 Porosidad total

Mediante los valores de la densidad real y la densidad aparente se obtuvo la porosidad total por medio de la siguiente fórmula (24).

$$P = S - S_a / S * 100$$

Donde:

P = porosidad en porcentaje del volumen total de una muestra

S = densidad real del suelo

S_a = densidad aparente del suelo

8.4.6 Conductividad hidráulica o permeabilidad

Se determinó por medio de la prueba de permeabilidad de cabeza variable. Se utilizó un cilindro de suelo sobre el cual se mantiene una carga constante de agua, midiendo después del equilibrio el volumen que pasa a través del suelo en un tiempo determinado; por medio de un permeámetro de la Universidad del Cauca de cabeza variable (figura 11).

Los cálculos se realizan a partir de la siguiente ecuación (17):

$$K = 2.3 a \cdot L / A \cdot t \log_{10} h_1 / h_2$$

K: Conductividad hidráulica en cm/hora.

a: Sección transversal de la bureta (cm²).

L: Longitud de la muestra (cm).

A: Sección transversal de la muestra (cm²).

t= Tiempo en el cual desciende el nivel del agua de un punto a otro de la bureta.

h₁ = Carga inicial en el instante t₁

h₂ = Carga inicial en el instante t₂

Figura 11. Permeámetro de la Universidad del Cauca



8.5 IDENTIFICACIÓN DE PLANTAS

Se realizó un registro e identificación de las plantas que crecen en las parcelas en proceso de sucesión natural. Además cada mes se determinó el porcentaje de cobertura de cada parcela.

8.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los valores obtenidos de volumen de escorrentía, suelo arrastrado, conductividad, pH, concentración de PO_4^{-3} , concentración de NO_3^- , humedad, densidad real, permeabilidad, por no cumplir las afecciones de normalidad, igualdad de varianza, tamaño de la muestra, se les aplicó pruebas no paramétrica como la de Wilcoxon y la de Mann Whitney. Los datos de densidad aparente y porosidad total al cumplir con los requisitos antes mencionados, fue posible aplicarles el Análisis de varianza univariante.

Todos los datos fueron procesados mediante el Programa Estadístico SPSS 11.5 para Windows, con un nivel de significancia máximo de 0.05.

9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tanto en la determinación de las concentraciones de nitratos y de fosfatos como de escorrentía y arrastre de suelo, se trabajó con los promedios registrados en las repeticiones de cada tratamiento y luego se realizó la sumatoria para obtener los datos totales por mes, de esta manera las comparaciones se efectuaron basándose en los totales mensuales.

9.1 CONCENTRACIÓN DE NITRATOS Y FOSFATOS EN LA ESCORRENTIA

La tabla 1 presenta las concentraciones obtenidas de los iones analizados en la escorrentía en las parcelas con suelo desnudo.

Tabla 1. Totales mensuales de nitratos y fosfatos tratamiento 1.

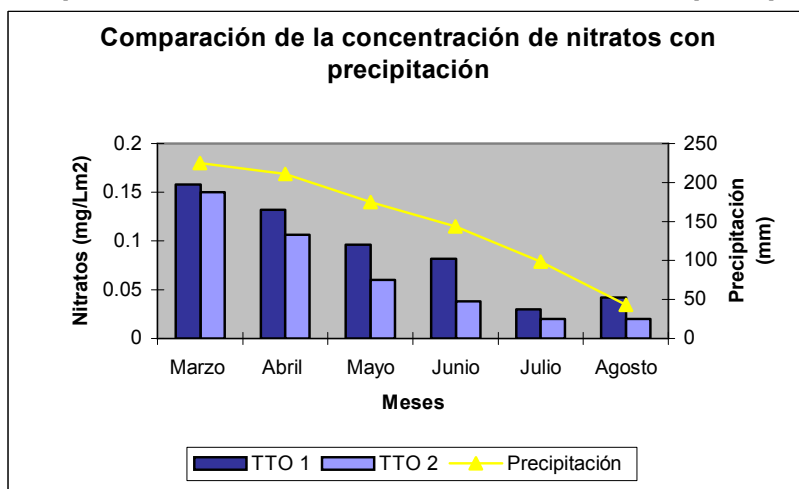
MESES	N-NO ₃ ⁻ (mg/Lm ²)	P-PO ₄ ³⁻ (mg/Lm ²)
Marzo	0.158	0.0110
Abril	0.132	0.0108
Mayo	0.096	0.0076
Junio	0.082	0.0060
Julio	0.030	0.0020
Agosto	0.042	0.0022
TOTAL	0.540	0.0396

El nitrato vario entre 0.030 y 0.158 mg/Lm², presentó las mayores concentraciones en los meses de marzo y abril, los cuales corresponden a los meses de mayores precipitaciones (ver figura 12 y 14) y por ende el volumen de escorrentía. La cantidad total de concentración de nitrato lavado por área de las parcelas durante los seis meses fue de 0.540 mg/L m².

El nitrato presentó mayores pérdidas que el fosfato por ser este un elemento soluble y con gran movilidad en el perfil del suelo, por lo tanto los nitratos son trasladados por el agua, hacia abajo y lateralmente en los períodos de lluvia, como también hacia arriba por capilaridad, como consecuencia de la evaporación (32). Además las concentraciones de nitrato en el suelo son mayores que las de fosfato.

La causa más importante de la pérdida de nitratos es el lavado. El exceso de agua y de percolación, sobre todo en suelos ligeros y la falta de plantas en desarrollo activo, sistema radicular profundo dan lugar a pérdidas muy considerables de los nitratos formados a partir de la materia orgánica del suelo y del NH₄⁺ (32).

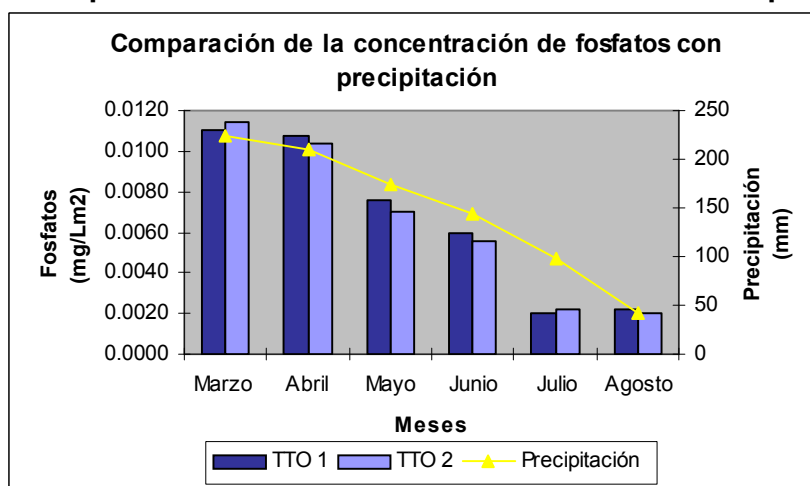
Figura 12. Comparación de la concentración de NO_3^- con precipitación.



El fosfato registró una concentración total de 0.0396 mg/Lm^2 , con valores que oscilaron entre 0.0020 y 0.0110 mg/Lm^2 . El mayor valor fue encontrado en el mes de marzo, mientras que las menores concentraciones se registraron en julio y agosto (ver figura 13). La cantidad de fosfato presente fue muy baja debido a que este elemento se encuentra en el suelo en concentraciones menores.

El tratamiento con suelo desnudo presenta las concentraciones más altas de pérdida de nitratos y fosfatos debido principalmente al mayor volumen de escorrentía.

Figura 13. Comparación de la concentración de fosfatos con precipitación.



La tabla 2 indica las concentraciones obtenidas de los iones analizados en la escorrentía en el tratamiento 2 con cobertura vegetal en proceso de sucesión natural.

Tabla 2. Totales mensuales de nitratos y fosfatos tratamiento 2.

MESES	N-NO₃⁻ (mg/L m²)	P-PO₄³⁻ (mg/Lm²)
Marzo	0.150	0.0114
Abril	0.106	0.0104
Mayo	0.060	0.0070
Junio	0.038	0.0056
Julio	0.020	0.0022
Agosto	0.020	0.0020
TOTAL	0.394	0.0386

Al igual que en el tratamiento de suelo desnudo el nitrato se presentó en mayores concentraciones en los meses de marzo y abril, siendo estos meses de mucha lluvia (ver figura 12 y 14), las concentraciones de nitrato en el tratamiento 2 (cobertura vegetal) se reducen debido a la cobertura vegetal que protege al suelo de la escorrentía superficial y por lo tanto del arrastre de nutrientes.

En relación con el fosfato su concentración total fue de 0.0386 mg/Lm², el mayor valor fue encontrado en el mes de marzo 0.0114 mg/Lm², al igual que el tratamiento de suelo desnudo la cantidad de fosfato presente fue muy baja.

Las concentraciones de fosfato fueron similares en el tratamiento de suelo desnudo y en el tratamiento de cobertura vegetal, manteniéndose valores bajos durante todo el tiempo del estudio.

Las pequeñas concentraciones de fosfato encontradas se podrían explicar parcialmente, por la inmovilización del ión por parte de compuestos que se pueden encontrar en el suelo tales como fosfatos de calcio (Ca), hierro (Fe) y aluminio (Al), fosfatos retenidos en el humus o fijados fuertemente en las arcillas.

Por otro lado el fósforo es bastante insoluble en el suelo, por lo tanto este nutriente se difunde muy lentamente y solamente en distancias muy cortas (12).

Hudson (1981) citado por Restrepo H, afirma que la pérdida de P esta más asociada a la erosión de sólidos que a la escorrentía (41).

El fósforo se pierde principalmente con las partículas coloidales del suelo, en cuya superficie esta absorbido, mientras que el nitrógeno en forma de nitrato o nitrito es

soluble, por lo que se elimina en disolución a través de la escorrentía sin que exista ningún desplazamiento de suelo (15).

En las capas superficiales de los suelos se concentran gran parte de los nutrientes que las plantas necesitan para subsistir. La pérdida de estas capas por la erosión puede causar que un suelo se vuelva estéril. La presencia de cobertura vegetal es imprescindible para que el agua de las precipitaciones se infiltre.

En general la pérdida de nutrientes esta en relación directa a la cantidad de agua de escorrentía, del suelo erosionado y de la concentración de nutrientes del suelo.

9.2 PRUEBAS NO PARAMÉTRICAS PARA NITRATOS Y FOSFATOS

De acuerdo a la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk (ver anexo) los datos no se acoplan a la distribución normal por tal razón cuando no se cumple el supuesto de distribución normal de las poblaciones estadísticas a comparar y cuando las muestras seleccionadas son pequeñas no se puede aplicar a los datos pruebas paramétricas, por lo tanto, se recurrió a procedimientos estadísticos no paramétricos y una de las pruebas mas adecuadas para el análisis de los datos es la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon de pares coincidentes.

A continuación se presenta los resultados y análisis de los datos totales mensuales de nitratos y fosfatos aplicando la prueba de Wilcoxon.

9.2.1 Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon de pares coincidentes para nitratos

Según la prueba de Wilcoxon, con un nivel de significancia observado de 0.028, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de distribución y por lo tanto, se puede afirmar que las concentraciones de nitratos determinados en la escorrentía superficial de las parcelas con cobertura vegetal en proceso de sucesión natural son menores que las concentraciones de nitratos de las parcelas de suelo desnudo.

Tabla 3. Rangos de la prueba de Wilcoxon para nitratos.

		Rangos		
		N	Rango promedio	Suma de rangos
Nitratos totales TTO 2 -	Rangos negativos	6 ^a	3.50	21.00
Nitratos totales TTO 1	Rangos positivos	0	.00	.00
	Empates	0		
	Total	6		

a. Nitratos totales TTO 2 < Nitratos totales TTO 1

Tabla 4. Estadística de contraste prueba de Wilcoxon para nitratos

Estadísticos de contraste ^b

	Nitratos totales TTO 2 - Nitratos totales TTO 1
Z	-2.201 ^a
Sig. asintót. (bilateral)	.028

a. Basado en los rangos positivos.

b. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

9.2.2 Prueba de los rangos con signo de wilcoxon de pares coincidentes para fosfatos

Tabla 5. Rangos de la prueba de Wilcoxon para fosfatos

		Rangos		
		N	Rango promedio	Suma de rangos
Fosfatos totales TTO 2 -	Rangos negativos	4 ^a	3.88	15.50
Fosfatos totales TTO 1	Rangos positivos	2 ^b	2.75	5.50
	Empates	0 ^c		
	Total	6		

a. Fosfatos totales TTO 2 < Fosfatos totales TTO 1

b. Fosfatos totales TTO 2 > Fosfatos totales TTO 1

c. Fosfatos totales TTO 2 = Fosfatos totales TTO 1

Tabla 6. Estadística de contraste prueba de Wilcoxon para fosfatos

Estadísticos de contraste ^b	
	Fosfatos totales TTO 2 - Fosfatos totales TTO 1
Z	-1.063 ^a
Sig. asintót. (bilateral)	.288

a. Basado en los rangos positivos.

b. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

Para los fosfatos la prueba de Wilcoxon no encontró diferencia estadísticamente significativa ($p = 0.288$), al comparar el tratamiento de cobertura vegetal y suelo desnudo no hay diferencia en el nivel ni en la distribución de los fosfatos.

9.3 PRECIPITACIÓN

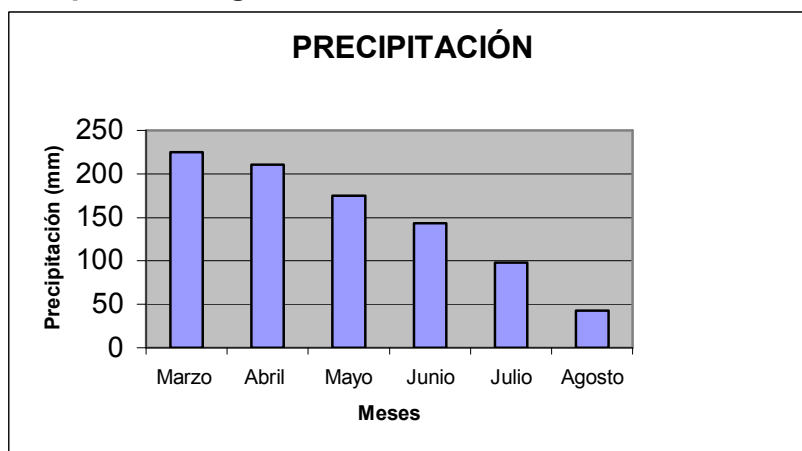
La tabla 7 indica la precipitación total mensual registrada durante el estudio.

Tabla 7. Precipitación registrada durante el estudio.

MESES	Precipitación (mm)
Marzo	224.7
Abril	210.7
Mayo	175.0
Junio	143.6
Julio	98.1
Agosto	42.8
TOTAL	894.9

Los volúmenes reportados por la precipitación corresponden a promedios tomados de los doce pluviómetros y luego se realizó la sumatoria para obtener los datos totales por mes. La precipitación total durante la época de estudio fue de 894.9 mm, presentándose los mayores aportes en los meses de marzo (224.7) y abril (210.7) por ser estos meses de invierno. La figura 18 indica las variaciones observadas en la precipitación.

Figura 14. Precipitación registrada durante el estudio



9.4 ANÁLISIS DE LOS VOLÚMENES DE AGUA DE ESCORRENTÍA Y DE SUELO ARRASTRADO

En la tabla 8 y 9 se presentan los valores de escorrentía y de suelo arrastrado total mensual producidas en el tratamiento de suelo desnudo.

Tabla 8. Totales mensuales de escorrentía y suelo arrastrado (Kg) en el tratamiento 1 (Suelo desnudo).

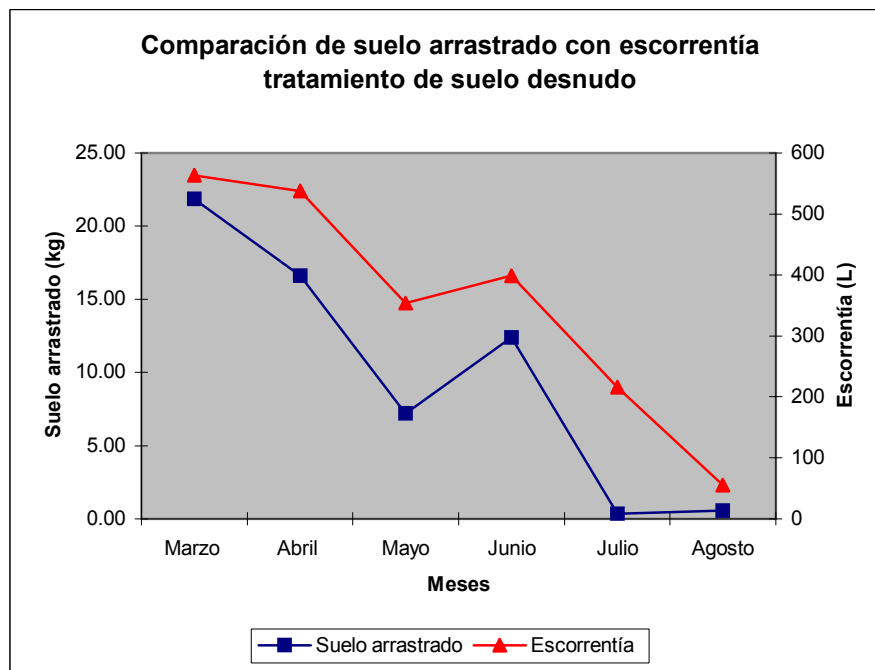
MESES	Escorrentía (L)	Suelo arrastrado (Kg)	Suelo arrastrado (Kg/Lmes)
Marzo	563	21.86	0.039
Abril	538	16.59	0.030
Mayo	354	7.18	0.020
Junio	399	12.41	0.031
Julio	216	0.34	0.002
Agosto	55	0.55	0.010
TOTAL	2125	58.93	0.133

Tabla 9. Totales mensuales de escorrentía y suelo arrastrado (g) en el tratamiento 1 (Suelo desnudo).

MESES	Escorrentía (L)	Suelo arrastrado (g)	Suelo arrastrado (g/Lmes)
Marzo	563	21860.0	38.83
Abril	538	16590.0	30.84
Mayo	354	7180.0	20.28
Junio	399	12410.0	31.10
Julio	216	340.0	1.57
Agosto	55	550.0	10.00
TOTAL	2125	58930.0	132.62

La mayor cantidad de suelo arrastrado se presento en el mes de marzo con 38.83 g/L, siendo este un mes de mucha escorrentía 563 L (ver figura 15). Los valores mas bajo de suelo arrastrado se obtuvieron en julio y agosto, por ser estos meses de verano, en los cuales la reducción la escorrentía es muy notable.

Figura 15. Comparación de suelo arrastrado con escorrentía tratamiento de suelo desnudo.



El volumen total de escorrentía colectado fue de 2125 L, con un total de pérdida de suelo de 132.62 g/L durante el período de estudio.

En el tratamiento de suelo desnudo se presentaron mayores pérdidas de suelo, porque periódicamente se realizaba una limpieza manual de las plantas que crecían sobre las parcelas, por lo tanto, el suelo estuvo descubierto durante toda la investigación, sometiéndolo a la acción directa del impacto de las gotas de lluvia, este impacto desagrega las partículas, liberando a las más pequeñas, causando taponamiento de los poros del suelo por las partículas finas liberadas que impiden la rápida infiltración y aumenta la capacidad de transporte por el agua de escorrentía. Esto incremento su cantidad y velocidad debido a la pendiente del terreno (20%) que es un factor que influencia fuertemente las pérdidas de suelo y agua por erosión hídrica.

La tabla 10 y 11 indica los valores de escorrentía y de suelo total arrastrado en el tratamiento de cobertura vegetal en proceso de sucesión natural.

Tabla 10. Totales mensuales de escorrentía y suelo arrastrado (Kg) en el tratamiento 2 (cobertura vegetal en proceso de sucesión natural)

MESES	Escorrentía (L)	Suelo arrastrado (Kg)	Suelo arrastrado (Kg/Lmes)
Marzo	514	10.83	0.0210
Abril	472	2.22	0.0047
Mayo	326	0.64	0.0019
Junio	253	0.31	0.0012
Julio	178	0.13	0.0007
Agosto	33	0.02	0.0006
TOTAL	1776	14.14	0.0301

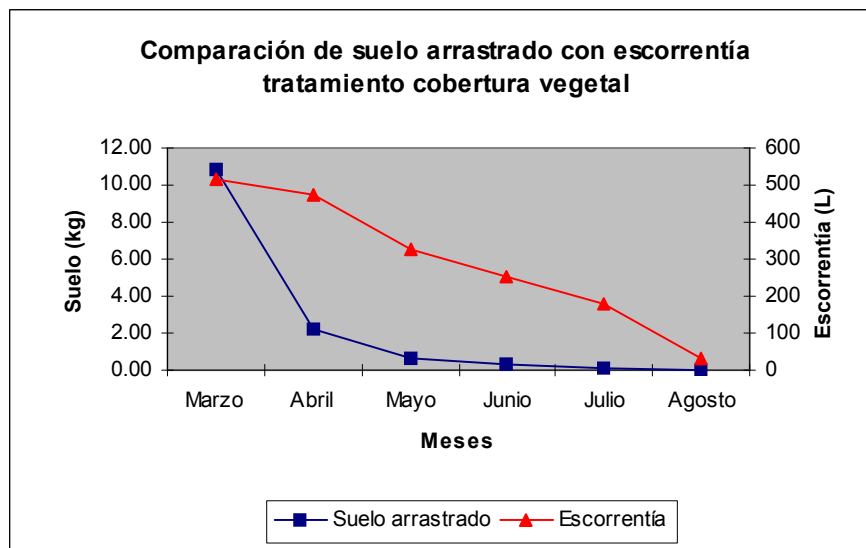
Tabla 11. Totales mensuales de escorrentía y suelo arrastrado (g) en el tratamiento 2 (cobertura vegetal en proceso de sucesión natural).

MESES	Escorrentía (L)	Suelo arrastrado (g)	Suelo arrastrado (g/Lmes)
Marzo	514	10830	21.07
Abril	472	2220	4.70
Mayo	326	640	1.96
Junio	253	310	1.23
Julio	178	130	0.73
Agosto	33	20	0.60
TOTAL	1776	14150	30.29

El mes de mayor suelo arrastrado fue marzo 10.83 Kg, pero a medida que transcurrieron los meses de estudio este valor fue decreciendo de una manera muy significativa, tan pronto como se implantaron las plantas, y continuo en un nivel muy bajo, hasta llegar a 0.02 Kg que fue el menor valor presentado en el mes de agosto (ver figura 16). En total el suelo arrastrado fue de 30.29 g/L durante el periodo de estudio.

En cuanto a la escorrentía en este tratamiento fue menor en comparación con el tratamiento 1, presentando un total de 1776 L durante todo el estudio.

Figura 16. Comparación de suelo arrastrado con escorrentía tratamiento cobertura vegetal.



Al iniciar el estudio este tratamiento se encontraba con suelo desnudo debido a las actividades de labranza realizadas durante la construcción de las parcelas, todo esto favoreció la escorrentía y el arrastre de suelo durante el mes de marzo, sin embargo dadas las condiciones tropicales de la zona, la vegetación natural no tardó en desarrollarse, cubriendo el suelo y protegiéndolo del efecto erosivo de la lluvia, reduciendo el impacto de las gotas de lluvia al caer, las cuales se escurren lentamente hasta la superficie del suelo donde se infiltran rápidamente, por lo tanto se incrementa el porcentaje de infiltración y disminuye la escorrentía y su capacidad de transporte de sedimentos.

Cuando un suelo esta bien estructurado, permite la penetración de las raíces, el intercambio de gases y la absorción fácil del agua lluvia. Cuanta más lluvia es absorbida por el suelo, se produce menor pérdida de suelo. Por lo tanto la pérdida

de suelo tiene lugar cuando el suelo esta degradado pues es menos capaz de absorber la lluvia y el resultado es mayor desgaste y erosión (14).

En cuanto a la escorrentía este tratamiento presenta valores más bajos que el tratamiento de suelo desnudo, esto indudablemente es debido a la protección de la cobertura vegetal sobre el suelo.

Los valores de suelo arrastrado reportados en esta investigación se pueden extrapolar a ton/ha/mes, como se indica en la tabla 12.

Tabla 12. Suelo arrastrado en los dos tratamientos suelo desnudo (TTO 1) y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural (TTO 2).

MESES	TTO 1 Suelo arrastrado (ton/ha/mes)	TTO 2 Suelo arrastrado (ton/ha/mes)
Marzo	1.457	0.722
Abril	1.106	0.148
Mayo	0.478	0.042
Junio	0.827	0.021
Julio	0.022	0.009
Agosto	0.036	0.001
TOTAL	3.926	0.943

Los resultados obtenidos en la tabla 12, reportan un total de 3.926 ton/ha/6meses y 0.943 ton/ha/6meses para el tratamiento de suelo desnudo y cobertura vegetal respectivamente. Por lo tanto, teniendo como referencia el régimen bimodal del municipio de Popayán, en el cual la primera época de lluvia se presenta, entre marzo, abril a mayo y la segunda de octubre, noviembre a diciembre. Se podría hacer una aproximación del suelo arrastrado en un año, en unidades ton/ha/año como se reporta en la mayoría de los artículos científicos sobre el tema. Los resultados son los siguientes 7.852 ton/ha/año para el tratamiento de suelo desnudo y 1.886 ton/ha/año en tratamiento de cobertura vegetal en proceso de sucesión natural.

9.4.1 Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon de pares coincidentes para suelo arrastrado

De acuerdo a la prueba de normalidad de Kolmogorov Smirnov y Shapiro-Wilk (ver anexo) los datos no se acoplan a la distribución normal, por lo tanto se recurrió a procedimientos estadísticos no paramétricos utilizando la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon de pares coincidentes.

Tabla 13. Rangos de la prueba de Wilcoxon para suelo arrastrado

		Rangos		
		N	Rango promedio	Suma de rangos
Suelo total TTO 2 - Rangos negativos		6 ^a	3.50	21.00
Suelo total TTO 1 Rangos positivos		0	.00	.00
	Empates	0		
	Total	6		

a. Suelo total TTO 2 < Suelo total TTO 1

Tabla 14. Estadística de contraste prueba de Wilcoxon para suelo arrastrado

Estadísticos de contraste ^b	
	Suelo total TTO 2 - Suelo total TTO 1
Z	-2.201 ^a
Sig. asintót. (bilateral)	.028

a. Basado en los rangos positivos.

b. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

Según la prueba de Wilcoxon, hay suficientes pruebas estadísticas (con $p = 0.028$), para rechaza la hipótesis nula de igualdad de distribución, por lo tanto se puede afirmar que el arrastre de suelo en el tratamiento de suelo desnudo es mayor que el tratamiento de cobertura vegetal en proceso de sucesión natural.

9.4.2 Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon de pares coincidentes para escorrentía

De acuerdo a la prueba de normalidad de Kolmogorov Smirnov y Shapiro-Wilk (ver anexo) los datos no se acoplan a la distribución normal, por lo tanto se recurrió a procedimientos estadísticos no paramétricos utilizando la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon de pares coincidentes.

Tabla 15. Rangos de la prueba de Wilcoxon para escorrentía

		Rangos		
		N	Rango promedio	Suma de rangos
Escorrentia total TTO 2 - Rangos negativos		6 ^a	3.50	21.00
Escorrentia total TTO 1 Rangos positivos		0	.00	.00
	Empates	0		
	Total	6		

a. Escorrentia total TTO 2 < Escorrentia total TTO 1

Tabla 16. Estadística de contraste prueba de Wilcoxon para escorrentía

Estadísticos de contraste ^b	
	Escorrentía total TTO 2 - Escorrentía total TTO 1
Z	-2.201 ^a
Sig. asintót. (bilateral)	.028

a. Basado en los rangos positivos.

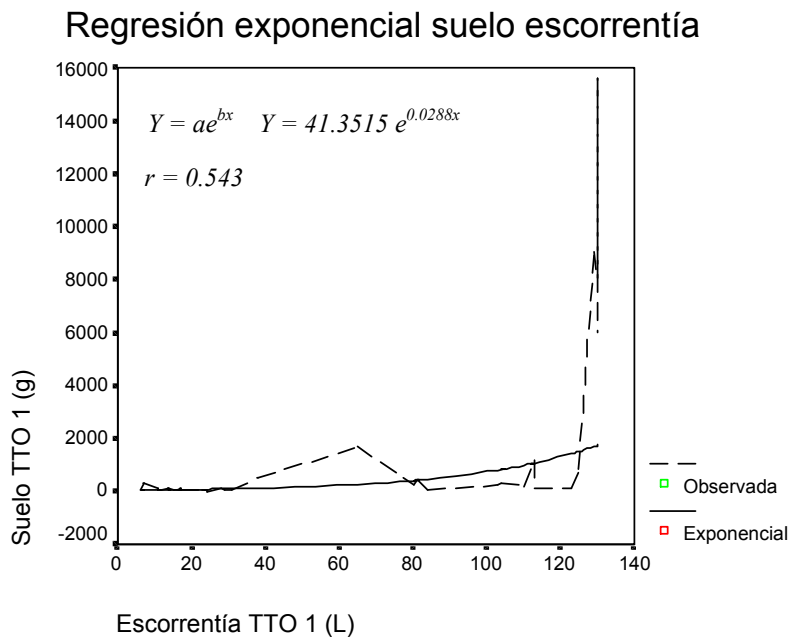
b. Prueba de los rangos con signo de Wilcoxon

Según la prueba de Wilcoxon (tabla 16), con un nivel de significancia observado de 0.028, se rechaza la hipótesis nula de igualdad de distribución y se puede afirmar que la escorrentía del tratamiento de cobertura vegetal en proceso de sucesión natural es menor que la escorrentía del tratamiento de suelo desnudo.

9.4.3 Regresión exponencial escorrentía vs suelo arrastrado

9.4.3.1 Regresión exponencial escorrentía vs suelo arrastrado tratamiento suelo desnudo

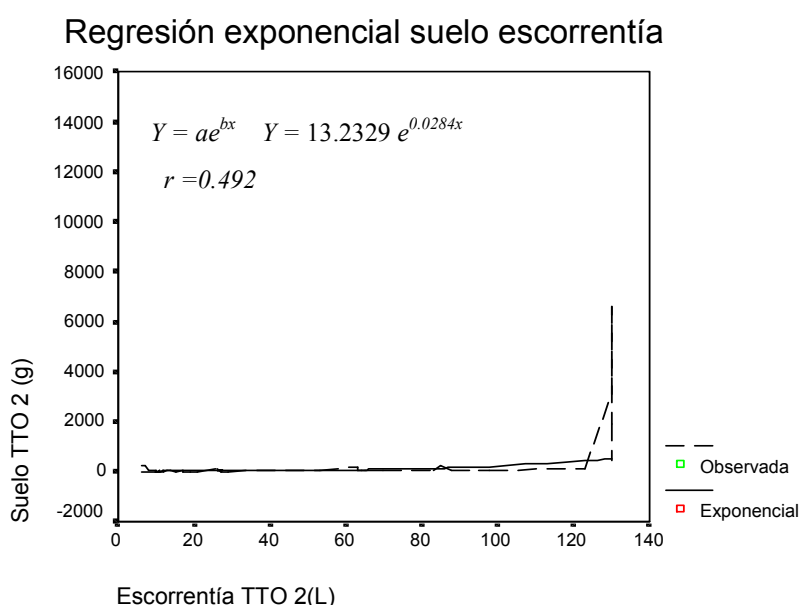
Figura 17. Regresión exponencial escorrentía vs suelo arrastrado tratamiento suelo desnudo



La escorrentía del tratamiento de suelo desnudo explica en un 54.3% los cambios o variaciones en la cantidad de suelo arrastrado, así al aumentar un litro en la escorrentía el suelo arrastrado también presenta una tendencia a aumentar en un valor promedio de 0.0288 g.

9.4.3.2 Regresión exponencial escorrentía vs suelo arrastrado tratamiento cobertura vegetal en proceso de sucesión natural

Figura 18. Regresión exponencial escorrentía vs suelo arrastrado tratamiento cobertura vegetal en proceso de sucesión natural



La escorrentía explica en un 49.2% los cambios o variaciones en la cantidad de suelo arrastrado en el tratamiento de cobertura vegetal en proceso de sucesión natural, así al aumentar un litro en la escorrentía el suelo arrastrado también presenta una tendencia a aumentar en un valor promedio de 0.0284 g.

Las gráficas de escorrentía vs. suelo arrastrado (Figuras 17 y 18) presentaron unos coeficientes de ajuste de 54.3 para el tratamiento de suelo desnudo y 49.2 para el tratamiento de cobertura vegetal, esta correlación entre estas dos variables es debida a que la pérdida de suelo por causa de la lluvia depende directamente de la escorrentía la cual actúa como medio de transporte de las partículas de suelo desprendidas por la lluvia o como factor erosivo desprendiendo el suelo cuando alcanza altas velocidades.

De esta forma cuando llueve sobre una zona, hay un período inicial en el que el agua es primero interceptada por la cobertura vegetal, y por todo aquello que impida que el agua llegue al suelo, este proceso se llama lluvia interceptada y puede llegar a controlar la mayor parte de una lluvia ligera; posteriormente el agua se infiltra en el suelo, llena las diferentes depresiones de la superficie. Después de llenarse las depresiones del suelo y si la intensidad de la lluvia excede la capacidad de infiltración del suelo, la diferencia es llamada lluvia en exceso. Esta lluvia primero se acumula sobre el terreno en forma superficial y a continuación fluye hacia los cauces.

A este movimiento se le denomina flujo por tierra; el agua que de esta forma llega a los cauces constituye el escurrimiento superficial (24).

Los valores de r 0.543 para el tratamiento de suelo desnudo y 0.492 para el tratamiento de cobertura vegetal en las gráficas de regresión exponencial (Figuras 17 y 18), se pueden mejorar realizando más pruebas en futuras investigaciones, en donde se controle mejor las mediciones de los volúmenes de agua de escorrentía, puesto que en este trabajo algunos de estos datos se perdieron cuando la intensidad de la lluvia fue muy alta, rebozando la capacidad de los colectores de escorrentía.

9.5 CONDUCTIVIDAD DEL AGUA DE ESCORRENTÍA

De acuerdo a la prueba de normalidad de Kolmogorov Smirnov y Shapiro-Wilk (ver anexo) los datos no se acoplan a la distribución normal, por lo tanto se recurrió a procedimientos estadísticos no paramétricos utilizando la prueba Mann-Whitney.

Los valores registrados de conductividad corresponden a los promedios registrados en las repeticiones de cada tratamiento, luego se realizó un promedio por cada mes, de esta manera las comparaciones se efectuaron en base promedios mensuales.

La tabla 17 muestra los valores encontrados de conductividad en el agua de escorrentía del tratamiento de suelo desnudo y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural.

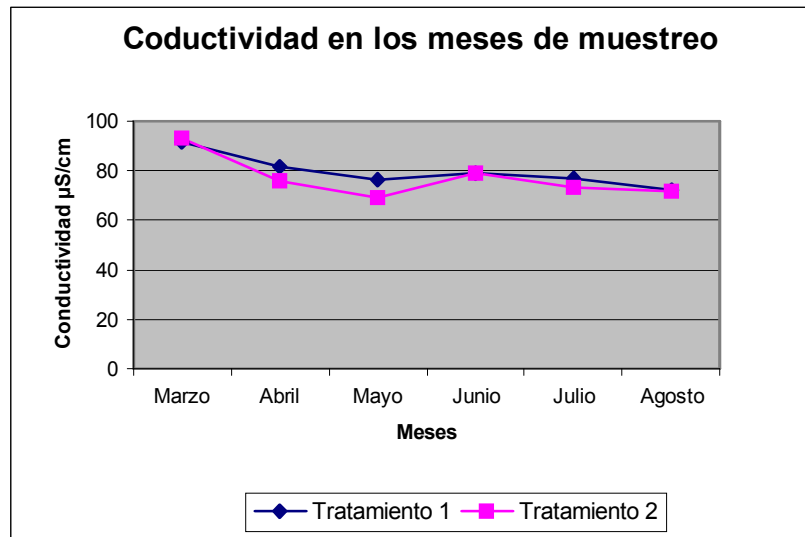
Tabla 17. Conductividad del tratamiento de suelo desnudo y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural.

MESES	Conductividad $\mu\text{S/cm}$ Tratamiento 1	Conductividad $\mu\text{S/cm}$ Tratamiento 2
Marzo	91,6	93.0
Abril	81,7	75.9
Mayo	76,7	69.1
Junio	79,1	79.0
Julio	77.2	73.1
Agosto	72,1	71.8

Los valores máximos y mínimos en el tratamiento de suelo desnudo durante el período de muestreo fueron 91.6 $\mu\text{S/cm}$ y 72.1 $\mu\text{S/cm}$, correspondiente a los meses de marzo y agosto, respectivamente. Mientras que en el tratamiento de cobertura vegetal los valores de conductividad fueron entre 93.0 y 69.1 $\mu\text{S/cm}$ correspondientes a los meses de marzo y mayo respectivamente.

En la figura 19 se observa el comportamiento del valor medio de la conductividad en cada uno de los meses, para el tratamiento 1 (suelo desnudo) y el tratamiento 2 (cobertura vegetal en proceso de sucesión natural).

Figura 19. Conductividad en los meses de muestreo.



La conductividad mas alta para los dos tratamientos estudiados se presentó al inicio de la investigación (marzo), a consecuencia del lavado de iones atmosféricos y del suelo debido al inicio de la temporada de lluvias abundantes. El patrón de distribución de la precipitación en el municipio de Popayán, es de régimen bímodal. El primer período con mayor concentración de lluvias se inicia en octubre y concluye en diciembre y el segundo periodo más lluvioso va de marzo a mayo. Teniendo en cuenta el régimen bímodal de la lluvia en Popayán, los resultados obtenidos en esta investigación sobre conductividad se puede comparar con un estudio realizado por Burbano M (6), sobre “Sensibilidad a la acidificación de la lluvia ácida en la ciudad de Popayán”, durante el período comprendido entre septiembre de 2001 a febrero de 2002, en el cual encontró que la conductividad se incrementa al inicio de la temporada de lluvia en el mes de octubre.

9.5.1 Prueba de Mann-Whitney para conductividad

Para la conductividad la prueba de Mann-Whitney no encontró diferencia estadísticamente significativa $p = 0.433$, al comparar el tratamiento de cobertura vegetal y suelo desnudo. Por lo tanto, se puede afirmar que este parámetro se comporta de una manera similar en los dos tratamientos.

Tabla 18. Prueba de Mann-Whitney para conductividad

Estadísticos de contraste ^a	
	Conductividad
U de Mann-Whitney	612.000
W de Wilcoxon	1315.000
Z	-.784
Sig. asintót. (bilateral)	.433

a. Variable de agrupación: Tipo de tratamiento

9.6 pH EN EL AGUA DE ESCORRENTÍA

De acuerdo a la prueba de normalidad de Kolmogorov Smirnov y Shapiro-Wilk (ver anexo) los datos no se acoplan a la distribución normal, por lo tanto se recurrió a procedimientos estadísticos no paramétricos utilizando la prueba Mann-Whitney.

Los valores registrados de pH corresponden a los promedios registrados en las repeticiones de cada tratamiento, luego se realizó un promedio por cada mes, de esta manera las comparaciones se efectuaron en base promedios mensuales.

La tabla 19 muestra los valores encontrados de pH en el agua de escorrentía del tratamiento de suelo desnudo y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural.

Tabla 19. pH del tratamiento de suelo desnudo y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural

MESES	PH	pH
	Tratamiento 1	Tratamiento 2
Marzo	6,97	7.03
Abril	7,28	7.26
Mayo	7,23	7.30
Junio	6,98	7.16
Julio	7,36	7.38
Agosto	6,88	7.09

El pH de los dos tratamientos estudiados presentó valores alrededor de 7, por lo tanto las muestras de agua de escorrentía fueron neutras, el valor máximo de pH fue de 7.36 y el mínimo de 6.88 unidades de pH en el tratamiento de suelo desnudo, mientras que en el tratamiento de cobertura vegetal el pH vario entre 7.03 y 7.38 unidades de pH.

9.6.1 Prueba de Mann-Whitney para pH

Para el pH la prueba de Mann-Whitney no encontró diferencia estadísticamente significativa $p = 0.449$, al comparar el tratamiento de cobertura vegetal y suelo desnudo. Por lo tanto, se puede afirmar que este parámetro se comporta de una manera similar en los dos tratamientos.

Tabla 20. Prueba de Mann-Whitney para pH

Estadísticos de contraste ^a

	pH
U de Mann-Whitney	614.500
W de Wilcoxon	1317.500
Z	-.757
Sig. asintót. (bilateral)	.449

a. Variable de agrupación: Tipo de tratamiento

9.7 PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Para realizar el análisis estadístico de las propiedades físicas del suelo, los datos se sometieron a pruebas de normalidad (Kolmogorov-Smirnov y Shapiro-Wilk) con base en el resultado (ver anexo) y tamaño de la muestra se decidió aplicar la prueba paramétrica y no paramétricas así:

- Para la humedad, densidad real y conductividad hidráulica se aplicó análisis de varianza factorial univariante.
- Para densidad aparente y porosidad total se aplicó la prueba de Mann Whitney.

9.7.1 Textura

Los datos de textura de los tratamientos suelo desnudo y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural se presentan en la tabla 21.

Tabla 21. Textura

Tratamiento	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Nombre textural
Suelo desnudo	70.38	20	9.62	Franco arenoso
Cobertura vegetal	64.78	28.8	6.42	Franco arenoso

Los resultados obtenidos de textura no muestran variación entre tratamientos para cada uno de los tamaños de partículas, motivo por el cual los tratamientos pertenecen a la clase textural franco arenosa, esta textura se caracteriza porque el suelo contiene mucha arena, pero no suficiente limo y arcilla para aportar un poco de cohesión, los granos individuales de arena pueden sentirse o verse con facilidad (24).

Si detallamos las diferencias entre tratamientos para cada tamaño de partícula, podemos observar que en el caso de las arenas y las arcillas, el tratamiento de suelo desnudo presenta mayor porcentaje que el tratamiento de cobertura vegetal en proceso de sucesión natural. Mientras que el porcentaje de limos es mayor en el tratamiento de cobertura vegetal.

La importancia del estudio de la textura radica en el papel que esta juega en la cantidad de agua que puede almacenar un suelo, su movimiento a través del perfil y en la facilidad de abastecimiento de nutrientes y aire; todos ellos son de gran importancia para la planta (25).

9.7.2 Humedad

La tabla 22 presenta los datos de humedad registrados en los tratamientos estudiados. Estos datos corresponden al promedio de las tres repeticiones realizadas en las parcelas de cada tratamiento.

Tabla 22. Humedad

Tratamiento	Humedad (%)
Suelo desnudo	11.59
Cobertura vegetal en proceso de sucesión natural	12.14

El porcentaje de humedad presentó un aumento en el tratamiento de cobertura vegetal en proceso de sucesión natural, debido a que se reducen las tasas de evaporación por el efecto de la cobertura vegetal y residuos superficiales, además se disminuye el área de suelo expuesta al ambiente. Sin embargo al aplicar la prueba estadística de Mann-Whitney no se encontró diferencia estadísticamente significativa ($p = 0.102$) entre los tratamientos.

Tabla 23. Prueba de Mann-Whitney para humedad

Estadísticos de contraste ^b

	HUMEDAD (%)
U de Mann-Whitney	19.000
W de Wilcoxon	64.000
Z	-1.636
Sig. asintót. (bilateral)	.102
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.114 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: TRATAMIENTO

9.7.3 Densidad real

Tabla 24. Densidad real

Tratamiento	Densidad real g/cm ³
Suelo desnudo	2.3089
Cobertura vegetal en proceso de sucesión natural	2.5099

Los valores reportados en la tabla 24 para esta propiedad están en un rango de bajos a normales (2.3 a 2.5 g/cm³) la presencia de materia orgánica en estos suelos es un factor que influye en dichos valores.

Tabla 25. Prueba de Mann-Whitney para densidad real

Estadísticos de contraste ^b

	DENSIDAD REAL
U de Mann-Whitney	.000
W de Wilcoxon	6.000
Z	-1.964
Sig. asintót. (bilateral)	.050
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.100 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: TRATAMIENTO

En el análisis estadístico al aplicar la prueba de Mann Whitney, se encontró que si hay diferencia estadísticamente significativa ($p = 0.05$) entre los tratamientos de suelo desnudo y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural en cuanto a la densidad real del suelo.

9.7.4 Densidad aparente

Los valores reportados en la tabla 26 corresponden a la densidad aparente, realizada por triplicado en las parcelas de cada tratamiento.

Tabla 26. Densidad aparente

Profundidad (cm)	Tratamiento suelo desnudo Densidad aparente g/cm ³	Tratamiento cobertura vegetal Densidad aparente g/cm ³
0 – 5	0.5726	0.5691
5 – 10	0.5858	0.5891
10 – 15	0.5610	0.5582
15 – 20	0.5327	0.5608

Los valores de densidad aparente en las profundidades evaluadas son bajos, lo cual es atribuido a la alta porosidad y a la incidencia de las cenizas volcánicas en la formación de estos suelos.

Según Montenegro H, en los suelos afectados por materiales volcánicos como los suelos andicos, las densidades aparentes son bajas (tres de los cuatro horizontes presentan valores inferiores a 0.85 g/cm³). Otros horizontes A; en varios perfiles, manifiestan, igualmente valores bajos (inferiores a 1.1 g/cm³), pero asociados ya con materiales orgánicos, como explicativos de los mismos (25).

Tabla 27. Análisis de varianza univariante para densidad aparente

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: DENSIDAD APARENTE

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	.032 ^a	7	.005	1.162	.337
Intersección	22.735	1	22.735	5762.449	.000
TTO	8.867E-05	1	8.867E-05	.022	.881
PROF	.032	3	.011	2.686	.054
TTO * PROF	.000	3	6.792E-05	.017	.997
Error	.253	64	.004		
Total	23.020	72			
Total corregida	.285	71			

a. R cuadrado = .113 (R cuadrado corregida = .016)

Tabla 28. Prueba de Duncan para la densidad aparente.

DENSIDAD APARENTE

Duncan^{a,b}

PROFUNDIDAD	N	Subconjunto	
		1	2
15 - 20	18	.5298	
10 - 15	18	.5596	.5596
0 - 5	18	.5708	.5708
5 - 10	18		.5875
Significación		.068	.215

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos.

Basado en la suma de cuadrados tipo III

El término error es la Media cuadrática (Error) = .004.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 18.000

b. Alfa = .05.

La prueba de comparación múltiple de Duncan, al confrontar los tratamientos de suelo desnudo y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural, arrojó como resultado dos subconjuntos homogéneos de las medias de la densidad aparente. El subconjunto 1, indicó que las medias fueron diferentes en la profundidad de 5 –

10 cm, con un grado de significancia del 0.068. En el subconjunto 2, la diferencia se presentó entre las medias de la profundidad de 15 – 20 cm, con una significancia de 0.215.

9.7.5 Porosidad total

Tabla 29. Porosidad total

Profundidad (cm)	Tratamiento suelo desnudo Porosidad total (%)	Tratamiento cobertura vegetal Porosidad total (%)
0 – 5	75.20	77.33
5 – 10	74.63	76.53
10 – 15	75.70	77.76
15 – 20	76.93	79.00

La porosidad total presentada en la tabla 29, para los tratamientos es alta con valores superiores al 75%. En el tratamiento de suelo desnudo la porosidad varia entre 75.20% y 76.93%; en cuanto al tratamiento de cobertura vegetal los valores fueron mas altos y variaron entre 76.53% y 79.00%.

Si se compara la porosidad total con la densidad aparente (tabla 26), las cuales están íntimamente relacionadas, se puede observar que los valores son inversos o sea que a mayor porosidad total menor es la densidad aparente.

Tabla 30. Análisis de varianza univariante para la porosidad total

Pruebas de los efectos inter-sujetos

Variable dependiente: POROSIDAD TOTAL

Fuente	Suma de cuadrados tipo III	gl	Media cuadrática	F	Significación
Modelo corregido	129.773 ^a	7	18.539	2.660	.018
Intersección	422849.813	1	422849.813	60678.916	.000
TTO	75.005	1	75.005	10.763	.002
PROF	54.640	3	18.213	2.614	.059
TTO * PROF	.128	3	.043	.006	.999
Error	445.993	64	6.969		
Total	423425.580	72			
Total corregida	575.766	71			

a. R cuadrado = .225 (R cuadrado corregida = .141)

En la tabla del análisis de varianza univariante (tabla 30), muestra que el tratamiento si influye ($p = 0.002$) en la porosidad total, mientras que la profundidad

tiene una débil influencia pero no alcanza a ser significativo ($p = 0.059$). El efecto del tratamiento es independiente de la profundidad ($p = 0.999$) esta independencia se debe a que la profundidad no alcanza a ser significativa.

Tabla 31. Prueba de Duncan para la porosidad total

POROSIDAD TOTAL

Duncan^{a,b}

PROFUNDIDAD	N	Subconjunto	
		1	2
5 - 10	18	75.5788	
0 - 5	18	76.2640	76.2640
10 - 15	18	76.7304	76.7304
15 - 20	18		77.9666
Significación		.223	.071

Se muestran las medias para los grupos en subconjuntos homogéneos.

Basado en la suma de cuadrados tipo III

El término error es la Media cuadrática (Error) = 6.969.

a. Usa el tamaño muestral de la media armónica = 18.000

b. Alfa = .05.

En la prueba de comparación múltiple de Duncan al comparar los tratamientos de suelo desnudo y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural, se observa que las medias se agruparon en dos subconjuntos. El primero, indica que las medias fueron diferentes en la profundidad de 15 – 20 cm, con un grado de significancia del 0.223. El segundo subconjunto presentó diferencias entre las medias de la profundidad de 5 – 10 cm, con una significancia de 0.071.

9.7.6 Conductividad hidráulica o permeabilidad

Tabla 32. Conductividad hidráulica o permeabilidad

Tratamiento	Profundidad (cm)	Conductividad hidráulica cm/h
Suelo desnudo	0 – 20	18.1995
Cobertura vegetal en proceso de sucesión natural	0 – 20	19.2216

Los valores de conductividad hidráulica (tabla 32) fueron altos por tal motivo el movimiento del agua en estos suelos es muy rápida, debido principalmente a las condiciones del suelo favorables para la infiltración, aspecto que estaría afectado

por las características como: textura relativamente más liviana (franco arenosa), contenido de materia orgánica; y también por su menor densidad aparente y mayor porosidad.

En los suelos derivados de cenizas volcánicas, durante los primeros 10 minutos, tanto el flujo por escorrentía como por percolación son altos. Después de este tiempo ambos flujos se tornan constantes, pero la percolación, siempre permanece mayor que la escorrentía, favorecida por los contenidos altos de materia orgánica (12 a 18%) y presencia alta de arena dentro del perfil, permeabilidad moderada y densidad aparente baja, que los convierte en suelos de condiciones físicas buenas (40).

La prueba de Mann-Whitney (tabla 33), reporto que no hay diferencia estadísticamente significativa ($p = 0.377$), al comparar las parcelas con suelo desnudo y con cobertura vegetal.

Tabla 33. Prueba de Mann-Whitney para conductividad hidráulica

Estadísticos de contraste ^b	
	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA
U de Mann-Whitney	12.500
W de Wilcoxon	33.500
Z	-.884
Sig. asintót. (bilateral)	.377
Sig. exacta [2*(Sig. unilateral)]	.394 ^a

a. No corregidos para los empates.

b. Variable de agrupación: TRATAMIENTO

9.8 COBERTURA VEGETAL

El tratamiento de cobertura vegetal en proceso de sucesión natural, al inicio de la investigación se encontraba en suelo desnudo, cuando se eliminó la vegetación muchas semillas quedaron en el suelo en estado latente, por lo tanto muchas de ellas germinaron inmediatamente, cubriendo el suelo con una vegetación de gramíneas que son de las primeras plantas que crecen en terrenos desnudos, iniciando el proceso de sucesión que eventualmente conducirá al crecimiento de arbustos mayores y árboles. Estas primeras plantas que aparecieron son conocidas como plantas colonizadoras o plantas pioneras, y son muy resistentes y se reproducen a gran velocidad para poder sobrevivir a condiciones desfavorables del terreno recientemente alterado.

Frecuentemente, a las plantas colonizadoras o gramíneas se les ha dado una mala fama con el nombre de "malezas"; sin tener en cuenta que gracias a estas etapas intermedias en la vegetación, el hábitat alterado puede regresar a ser un bosque natural. Además la rápida generación de la vegetación protege al suelo siendo menos susceptible a la erosión, reteniendo agua y favoreciendo la infiltración a través del perfil del suelo.

En un suelo con ausencia de vegetación como es el caso del tratamiento de suelo desnudo, el efecto es totalmente opuesto, de manera que la escorrentía superficial es elevada y al faltar una vegetación que retengan las partículas, se produce un arrastre intenso que genera gran erosión y se reduce la infiltración en el suelo.

Naturalmente, los cultivos con plantas densamente dispuestas, como prados y pastos tienden a cubrir mejor y a proteger el suelo, y los cultivos en surco suministran menos protección (15).

El inventario de las plantas que crecieron en las parcelas arrojó un total 30 especies colonizadoras. Las familias con mayor número de especies fueron Poaceae, Asteraceae, y Cyperaceae. La lista total de especies se muestra en la tabla 34.

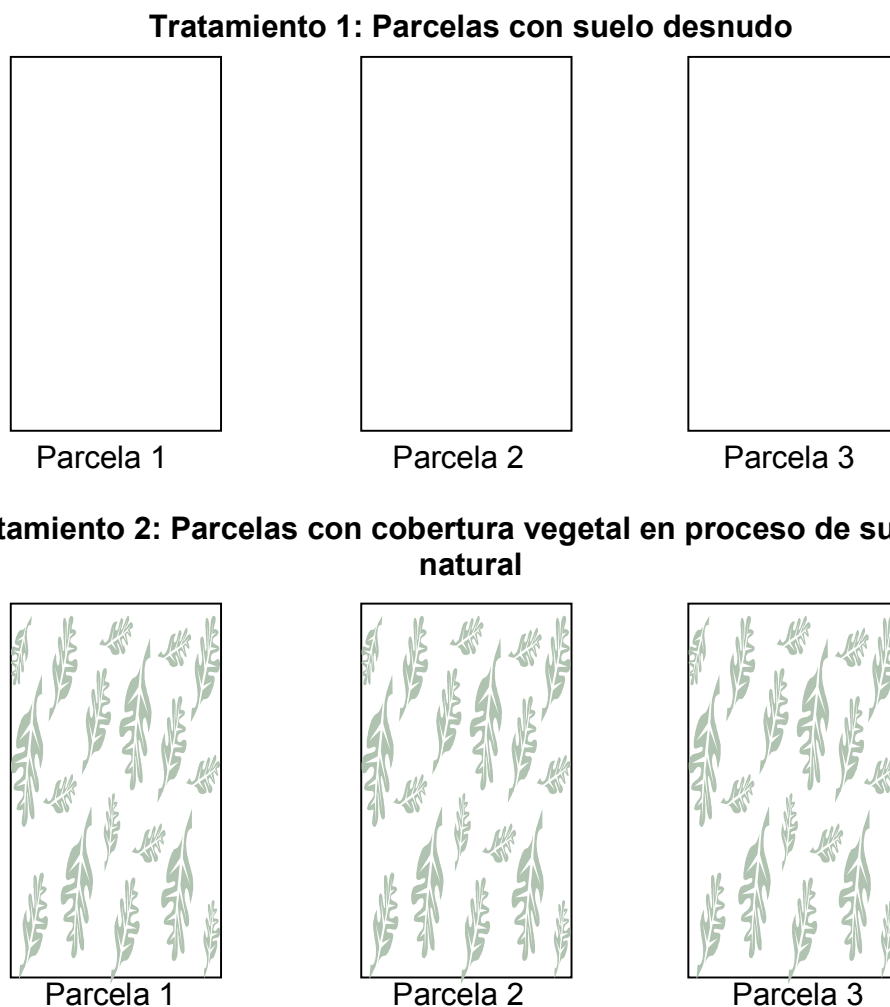
Tabla 34 Listado de las especies inventariadas en las parcelas en proceso de sucesión natural

Familia	Nombre específico
Apiaceae	<i>Hydrocotyle</i>
Asteraceae	<i>Ageratum conyzoides</i> L
Asteraceae	<i>Baccharis pedunculata</i> (Mill) Cabr
Asteraceae	<i>Bidens pilosa</i> L
Asteraceae	<i>Elephantopus mollis</i> Kunt
Asteraceae	<i>Emilia coccinea</i> (Sims) G Don
Cyperaceae	<i>Fimbristylis</i>
Cyperaceae	<i>Kyllinga pumila</i> Michx
Cyperaceae	<i>Fimbristylis complanata</i> (Retz) Link
Dennstaedtiaceae	<i>Pteridium aquilinum</i> L
Fabaceae	<i>Crotalaria sagittalis</i> L
Fabaceae	<i>Desmodium molliculum</i> (Kunth) DC
Fabaceae	<i>Eriosema diffusum</i> (Kunth) G Don
Hypoxidaceae	<i>Hipoxis decumbens</i> L
Iridaceae	<i>Sisyrinchium micranthum</i> Cav
Lamiaceae	<i>Hyptis atrorubens</i> Point
Lythraceae	<i>Cuphea carthagenesis</i> (Jacq) Macbr
Lythraceae	<i>Cuphea racemosa</i> (L.F) Spreng
Malvaceae	<i>Sida rhombifolia</i> L
Mimosaceae	<i>Mimosa albida</i> H & B
Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i> L
Ochnaceae	<i>Sauvagesia erecta</i> L
Plantaginaceae	<i>Plantago</i>
Poaceae	<i>Panicum</i>
Poaceae	<i>Brachiaria decumbens</i> Stapf
Poaceae	<i>Melinis minutiflora</i> Beauv
Poaceae	<i>Setaria parviflora</i> (Poir) Kerguelen
Rubiaceae	<i>Richardia scabra</i> L
Solanaceae	<i>Solanum sisymbriifolium</i> Lam
Verbenaceae	<i>Lantana</i>

9.8.1 Porcentaje de cobertura vegetal

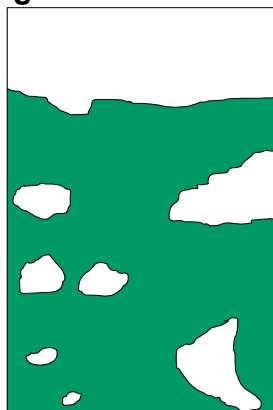
Por medio de los registros fotográficos realizados durante toda la investigación, se determinó el porcentaje de cobertura vegetal de cada mes, en las tres parcelas correspondientes al tratamiento de cobertura vegetal en proceso de sucesión natural (tabla 35). La figura 20 muestra la ubicación de las parcelas con suelo desnudo y cobertura vegetal en proceso de sucesión natural, y sus respectivas repeticiones en cada tratamiento.

Figura 20. Ubicación de las parcelas



Las siguientes figuras representan la cobertura vegetal de las tres parcelas del tratamiento dos, en los seis meses de estudio. El mes de marzo no está representado en las figuras porque las parcelas estaban con suelo desnudo. Las convenciones para las figuras son las siguientes: el color blanco en las figuras simboliza las áreas sin cobertura y el color verde las áreas con cubierta vegetal.

Figura 21. Parcela 1 Abril



Cobertura 58%

Figura 24. Parcela 1 Julio



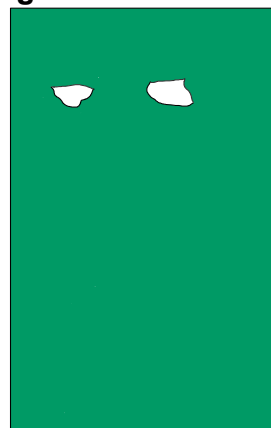
Cobertura 97.5%

Figura 22. Parcela 1 Mayo



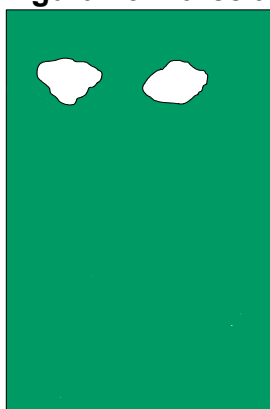
Cobertura 86.5%

Figura 25. Parcela 1 Agosto



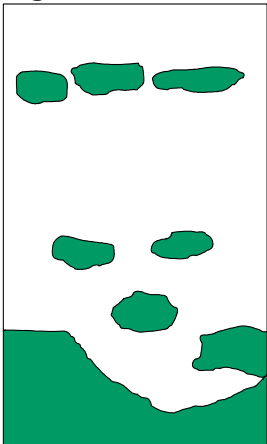
Cobertura 98.5%

Figura 23. Parcela 1 Junio



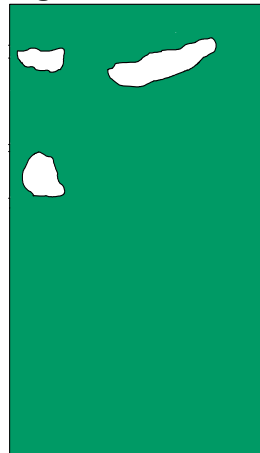
Cobertura 95%

Figura 26. Parcela 2 Abril



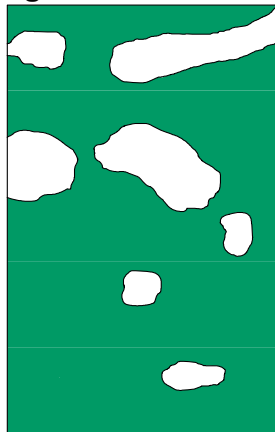
Cobertura 30%

Figura 29. Parcela 2 Julio



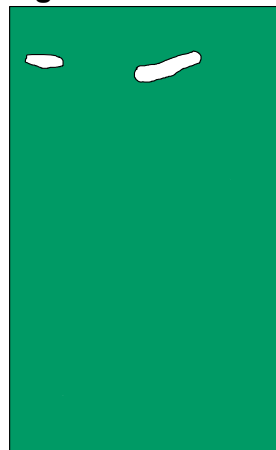
Cobertura 95.5%

Figura 27. Parcela 2 mayo



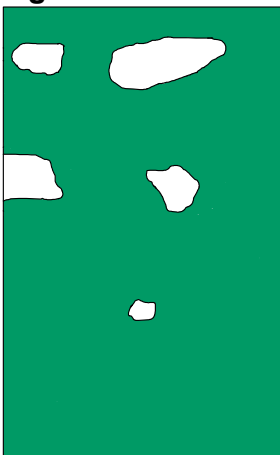
Cobertura 76%

Figura 30. Parcela 2 Agosto



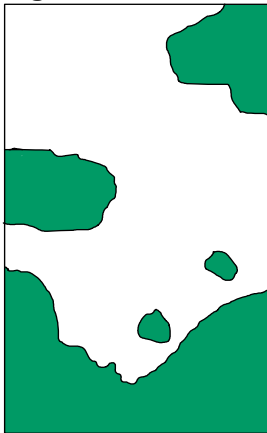
Cobertura 98%

Figura 28. Parcela 2 Junio



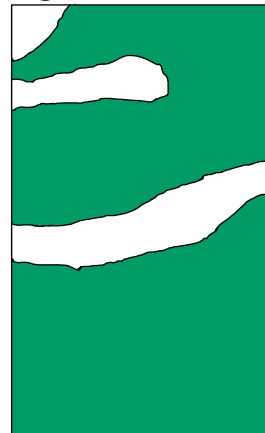
Cobertura 91.5%

Figura 31. Parcela 3 Abril



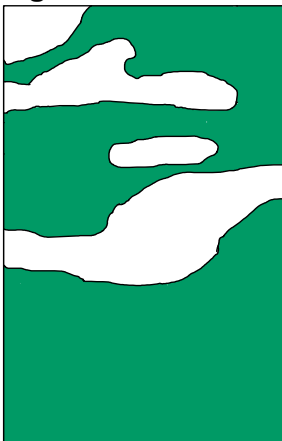
Cobertura 48.5%

Figura 34. Parcela 3 Julio



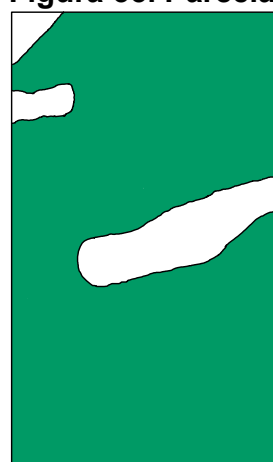
Cobertura 82%

Figura 32. Parcela 3 Mayo



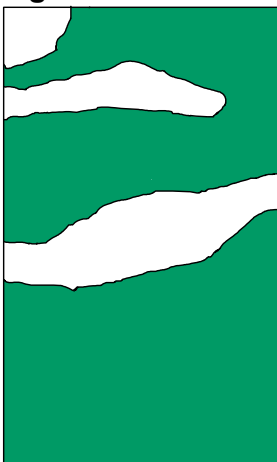
Cobertura 66%

Figura 35. Parcela 3 Agosto



Cobertura 87.5%

Figura 33. Parcela 3 Junio



Cobertura 80%

Tabla 35. Porcentaje de cobertura vegetal

Meses	Parcela 1 % cobertura	Parcela 2 % cobertura	Parcela 3 % cobertura
Marzo	0	0	0
Abril	58	30	48.5
Mayo	86.5	76	66
Junio	95	91.5	80
Julio	97.5	95.5	82
Agosto	98.5	98	87.5

Como se desprende de la tabla 35 el porcentaje de cobertura vegetal en el mes de marzo es 0% porque al iniciar la investigación las tres parcelas se encontraba con suelo desnudo. Las parcelas 1 y 2 alcanzaron un porcentaje de cobertura de 98.5% y 98% respectivamente, mientras que en la parcela tres el porcentaje se ve reducido en todos los meses de estudio a excepción del mes de abril, alcanzando por lo tanto un porcentaje de 87.5% al final de la investigación. La reducción en la cobertura vegetal en la parcela tres incremento el arrastre de suelo en comparación con las otras parcelas (1 y 2) en las cuales el arrastre fue menor.

Las figuras siguientes indican las tres parcelas con cobertura vegetal en proceso de sucesión natural al inicio y al final del estudio.

Figura 36. Parcela 1 al inicio de la investigación



Figura 37. Parcela 1 al final de la investigación



Figura 38. Parcela 2 al inicio de la investigación



Figura 39. Parcela 2 al final de la investigación



Figura 40. Parcela 3 al inicio de la investigación



Figura 41. Parcela 3 al final de la investigación



9.9 PAUTAS GENERALES PARA LA CONSERVACIÓN DE SUELOS EN LADERA

La zona andina por su diverso relieve presenta zonas con altas pendientes, en las cuales se han instalado la mayoría de los cultivos. La consecuencia que esto ha traído es un incremento en la degradación de los suelos, pérdida de su calidad y una acelerada erosión de los mismos. Esta amenaza a la productividad agrícola sostenible ha llevado a un considerable interés en las prácticas de conservación de suelos que controlen el desgaste y la erosión. Así, actualmente se promueven estas prácticas de conservación de suelos entre las cuales destacan las siguientes:

- Las rotaciones de cultivo, son aconsejables para disminuir las pérdidas de suelo porque ayudan a mejorar la fertilidad, controlar plagas o enfermedades, además un cambio en el sistema de enraizamiento mejora el flujo de humedad y de nutrientes. Una de las características más importantes de las rotaciones que pretenden reducir la erosión es que las rotaciones deben ser cortas de un cultivo especulativo a uno forrajero y de nuevo al primero. La reducción de la pérdida de suelo y de escorrentía en esta forma de conservación del suelo se debe a la estructura originada por la cuantiosa materia orgánica en este caso raíces en putrefacción y hojas (15).
- Coberturas muertas o “mulch”, consiste en dejar los residuos de las cosechas en la superficie para incorporarlos al suelo por medio del arado o aplicar cobertura vegetal muerta como rastrojo de maíz, frijol, hojas de plátano, pasto, etc. Este rastrojo le proporciona al suelo una excelente cobertura protectora, protegiéndolo del impacto de la lluvia.
El mulch a través del tiempo suministra nutrientes, aumenta la humedad del suelo, disminuye la temperatura del mismo, aumenta la actividad de la macrofauna (lombrices) y mejora las tasas de infiltración del agua (7).
- Una densidad óptima, la cobertura vegetal de hierba o cultivos forrajeros ofrecen al suelo una cobertura total, en comparación con los cultivos alineados que solo cubren una parte del suelo o los cultivos diseminados como los cereales en los cuales la cobertura puede ser uniforme pero no densa.
Pequeñas diferencias en la cobertura vegetal pueden ser responsables de grandes diferencias de pérdida de suelo (15).
- Barreras vivas, son franjas o hileras de arbustos plantados permanentemente, de crecimiento denso que se siembran a través de la pendiente. El objetivo de las barreras es disminuir la velocidad del agua de escorrentía, evitando el arrastre de suelo y en consecuencia la pérdida de nutrientes.

- Abonos verdes, son cultivos generalmente de leguminosas que se siembran y antes de su floración son incorporados al suelo, con el fin de incrementar la cantidad de materia orgánica y de nitrógeno asimilable, mejorándolo así química y físicamente.
- La labranza cero o mínima labranza, consiste en reducir en numero de operaciones de laboreo y plantar directamente. En estos sistemas las pérdidas de suelo por erosión son mínimas.

El objetivo de cualquier práctica de conservación del suelo deberá ser asegurar al máximo la incorporación de materia orgánica, máxima cobertura vegetal y evitar el laboreo con suelo desnudo.

Las gestiones necesarias para un buen control de la erosión coinciden con una agronomía intensiva lucrativa. Algunos agricultores temen que la introducción de medidas de conservación del suelo conduzcan a una disminución de la productividad o a prácticas antieconómicas, pero en realidad esto carece de fundamento (15).

10. CONCLUSIONES

Las pérdidas de nitratos calculadas en el agua de escorrentía fueron mayores en las parcelas de suelo desnudo 0.540 mg/Lm^2 , que en las parcelas con cobertura vegetal 0.394 mg/Lm^2 . En cuanto a los fosfatos en los dos tratamientos la pérdida de este nutrientes varió entre 0.0386 y 0.0396 mg/Lm^2 presentándose un leve incremento en las parcelas de suelo desnudo.

En el escurrimiento además de la pérdida de suelo y agua, se pierden nutrientes, que degradan el suelo y por ende disminuyen su capacidad efectiva. Porque en las primeras capas del suelo es donde se concentran la materia orgánica y algunos nutrientes.

En las parcelas de suelo desnudo se presentaron los mayores arrastres de sedimentos 58.93 Kg . En tanto que en los suelos bajo cobertura vegetal en proceso de sucesión natural fue 14.14 Kg . Extrapolando estos valores se obtiene $3.926 \text{ ton/ha/6meses}$ para suelo desnudo y $0.943 \text{ ton/ha/6meses}$ para cobertura vegetal. En los dos tratamientos estos valores se consideran mínimos y aceptables para fines de conservación. Sin embargo la cobertura vegetal en proceso de sucesión natural es una buena estrategia para reducir la erosión del suelo.

Teniendo como referencia el régimen bimodal del municipio de Popayán, en el cual la primera época de lluvia se presenta, entre marzo, abril a mayo y la segunda de octubre, noviembre a diciembre. Se realizó una aproximación del suelo arrastrado en un año, con el siguiente resultado 7.852 ton/ha/año para el tratamiento de suelo desnudo y 1.886 ton/ha/año en tratamiento de cobertura vegetal en proceso de sucesión natural.

La escorrentía registrada en los dos tratamientos varió debido a las características físicas del suelo y la cobertura vegetal. Presentándose en las parcelas de suelo desnudo 2125 L mientras que las parcelas de cobertura vegetal 1776 L .

El poder erosivo de la lluvia se reduce por la presencia de la cobertura vegetal creando conductos preferenciales de entrada hacia las capas más profundas aumentando la permeabilidad del suelo y reduciendo la escorrentía. El sistema radical tiene también gran importancia pues a medida que se eliminaba la cobertura vegetal aumento la escorrentía y el arrastre de sedimentos.

Si bien la información obtenida en este estudio cubre solo seis meses de mediciones, se confirma que en terrenos con unas mismas condiciones

edafoclimáticas y topográficas, la cubierta vegetal en proceso de sucesión natural representa una forma eficiente de protección del suelo.

En el mes de marzo se presentaron los mayores arrastres de suelo y agua, debido principalmente a las acciones de laboreo en la capa superficial del suelo durante la construcción de las parcelas. Como también a las precipitaciones presentadas en esa época.

La escorrentía y el arrastre de suelo mostraron una relación directamente proporcional, es decir que a mayor volumen de escurrimiento mayor arrastre de suelo.

Los suelos evaluados presentaron una alta infiltración, atribuida a los altos valores de porosidad total encontrados, influenciados por la textura franco arenosa, contenido de materia orgánica; y también por su menor densidad aparente, que permiten regular la escorrentía que incide en forma directa sobre la pérdida de suelo.

Las parcelas de escorrentía permanentes demostraron ser una buena herramienta para evaluar la susceptibilidad a la erosión, permitiendo comparar tratamientos con respecto a las variables de medición como pérdida nutrientes (nitratos y fosfatos) y suelo arrastrado.

El proceso de erosión hídrica aumenta a medida que se disminuye la cubierta vegetal, esto trae como consecuencia una pérdida proporcional de nutrientes, una reducción importante en la humedad del suelo y una menor oferta edáfica para mantener una cobertura vegetal protectora.

Los valores de r 0.543 para el tratamiento de suelo desnudo y 0.492 para el tratamiento de cobertura vegetal en las graficas de regresión exponencial, se pueden mejorar realizando más pruebas en futuras investigaciones, en donde se controle mejor las mediciones de los volúmenes de agua de escorrentía, puesto que en este trabajo algunos de estos datos se perdieron cuando la intensidad de la lluvia fue muy alta, rebozando la capacidad de los colectores de escorrentía.

Los resultados obtenidos en esta investigación de pérdida de suelo y nutrientes (nitratos y fosfatos), son importantes para que el Jardín Botánico los tenga en cuenta para fortalecer todos los procesos de conservación que se llevan a cabo, y así formular estrategias que mejoren la conservación del suelo.

11. RECOMENDACIONES

- Uno de los principios ecológicos del Jardín Botánico es la conservación de áreas de bosque nativo existente y potenciar los procesos de revegetalización natural. Por lo tanto, teniendo en cuenta este principio, el estudio realizando demuestra que la zona donde se instalaron las parcelas de escorrentía por encontrarse en mayor pendiente, debe permanecer con cobertura vegetal permanente, o de lo contrario se ocasionarían pérdidas muy significativas de nutrientes, suelo y agua, fundamentales para el normal desarrollo de las plantas.
- Es preciso que en futuras investigaciones de los procesos de pérdida de nutrientes en las parcelas de escorrentía, se cuantifique la pérdida de ion fosfato en los sedimentos, dado que según los reportes bibliográficos este ion se pierde mas con el suelo que con el agua de escorrentía.
- Implementar un nuevo sistema de recolección del agua de escorrentía en las parcelas de mayor capacidad, porque durante el estudio en los aguaceros mas intensos, la capacidad de los colectores no fue suficiente y se rebosaron, perdiéndose datos importantes, ya que las mayores pérdidas de suelo se registraron en estas ocasiones.
- Los datos pluviométricos se deben tomar de una estación climatológica, para tener mas precisión en los estudios, puesto que en los pluviómetros artesanales instalados en las parcelas no se pudo llevar un registro por evento de precipitación sino diario.
- Utilizar este trabajo como apoyo en la planeación de talleres didácticos dirigido a los agricultores con el fin de disminuir los riesgos de erosión en la zona, mediante demostraciones con las parcelas de escorrentía permanentes, que les permita entender cuáles son las prácticas agrícolas que afectan negativamente la capacidad del suelo para soportar las fuerzas erosivas, permitiéndoles tomar decisiones acertadas a la hora de implementar prácticas de conservación.

BIBLIOGRAFIA

- 1) ALCALDÍA MAYOR DE POPAYÁN. Plan de ordenamiento territorial. Documento técnico. Componente ambiental. p. 86 – 87.
- 2) ALCALDÍA MAYOR DE POPAYÁN. SECRETARIA DE PLANEACION MUNICIPAL. PLAN DE DESARROLLO RURAL. Diagnóstico para la implementación de un Plan Ambiental Municipal. Popayán: La secretaría, 1999.
- 3) APHA, AWWA, WPCF. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales. 17 ed. Madrid: Diaz de Santos.1992. p. 2-63.
- 4) AZCON. J., y TALON., M. Fundamentos de fisiología vegetal. España: McGRAW – HILL INTERAMERICANA. 2000. p. 83 – 97.
- 5) BURBANO., L. Dinámica de las tasas de mineralización en suelos de zona subandina, para dos tipos de cobertura vegetal meseta de Popayán Colombia, 2003,144 p. Trabajo de grado (Bióloga). Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación. Departamento de Biología.
- 6) BURBANO, M. Sensibilidad a la acidificación de la lluvia ácida en la ciudad de Popayán. 2003,148 p. Trabajo de grado (Bióloga). Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación. Departamento de Biología.
- 7) CADAVID , F. Conservación del suelo dedicado a la yuca. La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas Modernos de Producción Procesamiento, Utilización y Comercialización. P 104 125. Disponible en internet <[http://www.clayuca.org /PDF/libro_yuca/capitulo06.pdf](http://www.clayuca.org/PDF/libro_yuca/capitulo06.pdf) >
- 8) CERVANTES, C. y VAHRSON, Wilhelm. Características física y pérdida de nutrimentos de las parcelas de erosión de Cerbatana de Puriscal Costa Rica. En: Agronomía Costarricense. Vol.16, No. 1 (1992); p. 99-106.
- 9) DÍAZ D, Lily y MENDOZA, Martha. Aproximación a un modelo de flujo de biogeoelementos en el bosque altoandino de Monserrate, Cundinamarca, Colombia. Santafé de Bogotá, 1989, 265 p. Trabajo de grado (Biólogo). Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Biología.

- 10) ESCOBAR, J; AMEZQUITA, E. y NAVAS, J. Perdida del suelo y agua por erosión bajo diferentes manejos en un ultisol del Piedemonte Amazónico (Caquetá - Colombia). En: Suelos Ecuatoriales. Vol. 23, No. 1 y 2 (1993); p. 180-184.
- 11) Equipo del Proyecto Fertilizar - INTA Pergamino. Movilidad del Fósforo en el Suelo. Disponible en internet: <URL:<http://www.fertilizar.org.ar/articulos/Movilidad%20del%20Fosforo%20en%20el%20Suelo.htm>>
- 12) FIXEN P. Dinámica del fósforo en el suelo y en el cultivo en relación al manejo de los fertilizantes fosfatados. Potash & Phosphate Institute. INFOPOS. Disponible en internet < [http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/ltamn.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/b8153a5e80e11d9c05256d58005bb04a/\\$FILE/Dinamica%20del%20f%C3%B3sforo.pdf](http://www.ppi-ppic.org/ppiweb/ltamn.nsf/87cb8a98bf72572b8525693e0053ea70/b8153a5e80e11d9c05256d58005bb04a/$FILE/Dinamica%20del%20f%C3%B3sforo.pdf)>
- 13) Gobierno de Navarra. El ciclo del nitrógeno en los suelos agrícolas.[Online]. Microsoft FrontPage 3.0 [Navarra, España]: Boletín oficial de Navarra [SF]. Disponible en internet: <URL:<http://www.cfnavarra.es/agricultura/buenas/cap4.html>>
- 14) HELLÍN, J. De erosión de suelos a suelos de calidad. EN LEISA revista de agroecología Vol. 19.No 4, Abril 2004. Disponible en internet <<http://www.leisa-al.org.pe/anteriores/194/06.html>>
- 15) HUDSON, N. Conservación del suelo. España. Editorial REVERTE S.A. 1982. 334 p.
- 16) IDEAM. Estación climatológica del aeropuerto Guillermo León Valencia. Popayán.
- 17) ILLERA V, Esmeralda. Manual de laboratorios de mecánica de suelos. Producción intelectual profesor Universidad del Cauca.1998. p 171-179.
- 18) INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Compendio tesis y otros trabajos de grado. Bogotá: ICONTEC, 2004.
- 19) INSTITUTO GEOGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI. Suelos de Colombia. Bogotá: IGAC, 1995. p. 469- 483.
- 20) _____ Zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia. Volumen 13 No 11. Bogotá: IGAC, 1977. p. 106-114.
- 21) LA TORRE M, B. Efecto de sistemas de cultivos sobre la escorrentía, erosión y pérdida de nutrientes en un Entisol de la Selva Alta – CAP José Santos

Atahualpa – San Ramón – Chanchamayo. Lima, 1985, 136p. Universidad Nacional Agraria La Molina. Escuela de postgrados. Especialidad de suelos.

22) Lenntech Agua residual & purificación del aire Holding B.V. Rotterdamseweg 402 M2629 HH Delft. Disponible en Internet: <<http://www.lenntech.com/espanol/ciclo-fosforo.htm>>

23) MERCK. Manual del Spectroquant NOVA 60. Test No 14848 para fosfatos. Test No 14773 para nitratos 1999.

24) MONTENEGRO G, H. & MALAGON C, D. Propiedades físicas de los suelos. Bogotá: IGAC, 1990. 813 p.

25) MONTENEGRO G, H. Interpretación de las propiedades físicas del suelo. Memorias seminario taller Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos plantas y aguas para riego. Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Bogotá 1995. p. 99 – 127.

26) MOTHESES., M *et al.* Limitación nutricional por fósforo en plantaciones de teca (*Tectona grandis*), en los Llanos Occidentales venezolanos. Revista de la Facultad de Agronomía. (Maracay) 17:309-315. 1991. Disponible en internet: <URL:http://www.redpav_fpolar.info.ve/fagro/v17_14v171a190.html>

27) MUNÉVAR M, F. Principales procesos microbiológicos en el suelo y su función en la productividad agropecuaria. En: Suelos Ecuatoriales. Vol. 13 No. 2 (1983); p. 7-15.

28) NEBEL, B. J. Ciencias ambientales. Ecología y desarrollo sostenible. 6 ed. México: Prentice Hall. 1999. p. 221.

29) PLA SENTÍS, Idelfonso. La erodabilidad de los andisoles en latino América. En: Suelos Ecuatoriales. Vol. 22 No. 1 (1992); p. 33-42.

30) PORTA, J., *et al.* Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Madrid: Ediciones Mundi – Prensa, 1994. 167, 193, 194, 590 p.

31) PRADO WILDNER, L y VEIGA, M. Erosión de suelos en América Latina Tema 2: Erosión y pérdida de fertilidad del Suelo. FAO Santiago, Chile 1993. Disponible en Internet: <<http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S00.htm>>

32) PRIMO YÚFERA, E.& CARRASCO DURRIÉN, J M. Química agrícola. Madrid: Editorial Alambra, 1973. p. 233 – 235.

- 33) PROYECTO BIOSFERA. Ministerio de educación y ciencia Disponible en internet: <http://iris.cnice.mecd.es/biosfera/alumno/2bachillerato/Fisiologia_celular/contenidos11.htm>
- 34) RUPPENTHAL, M. Soil conservation in Andean cropping systems: soil erosion and crop productivity in traditional and forage-legume based cassava cropping systems in the South Colombian Andes. Ed: Center for Agriculture in the tropics and Subtropic, University of Hohenheim. Weikersheim. Maggraf. 1995. 108 p.
- 35) SALAZAR, M. Análisis cualitativo y cuantitativo de los nutrientes en agua lluvia que llega por medio del “throughfall” (paso de la lluvia a través del follaje), precipitación y los procesos de escorrentía superficial a la microcuenca Arrayanes, cuenca del río Las Piedras, municipio de Popayán, 1995, 121 p. Tesis (Maestría en Recursos Hidrobiológicos Continentales). Universidad del Cauca. Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación. Instituto de posgrados.
- 36) SMITH, R. L & SMITH, T. M. Ecología. 4 ed. Madrid: Pearson Educación, 2001. p. 134, 135, 393, 394.
- 37) TORRES M. P. Aporte al conocimiento de la Geología y Estratigrafía de la Formación Popayán, Departamento del Cauca. Novedades Colombianas. 1997. 7:4-28 p.
- 38) VARGAS, V. y RICSE, A. Efecto de diferentes sistemas de uso del suelo, en el estudio de la pérdida de nutrientes por erosión, escorrentía y lixiviación en Pucallpa. Instituto Nacional de Investigación Agraria. Programa Nacional de investigación en agroforestería y cultivos tropicales; informe anual 1995. Pucallpa Perú.
- 39) VIVAS, D. T. & E. MUÑOZ. Informe general del estado actual de los recursos naturales y del medio ambiente en el municipio de Popayán. Contraloría Municipal de Popayán, 1999.
- 40) RIVERA P, H. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos de ladera de la zona cafetera colombiana. Compendio de Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Medellín, Colombia. Patrocinado por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia y Colciencias 1999. p 1 – 50.
- 41) RESTREPO H, AMEZQUITA E Y NAVAS J. Dinámica del proceso de erosión en algunos suelos del piedemonte llanero. EN Suelos Ecuatoriales. Volumen 21 No 1, 1991, p 81 – 84.

ANEXO

Pruebas de normalidad

Tipo de tratamiento		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
Cantidad de Suelo (gr)	Suelo desnudo	,399	37	,000	,483	37	,000
	Cobertura vegetal	,428	37	,000	,342	37	,000
Escorrentia (L)	Suelo desnudo	,237	37	,000	,821	37	,000
	Cobertura vegetal	,248	37	,000	,807	37	,000
Nitratos (mg/L)	Suelo desnudo	,176	37	,005	,873	37	,001
	Cobertura vegetal	,252	37	,000	,785	37	,000
Fosfatos (mg/L)	Suelo desnudo	,415	37	,000	,690	37	,000
	Cobertura vegetal	,455	37	,000	,600	37	,000
pH	Suelo desnudo	,183	37	,003	,891	37	,002
	Cobertura vegetal	,235	37	,000	,795	37	,000
Conductividad	Suelo desnudo	,149	37	,038	,942	37	,055
	Cobertura vegetal	,203	37	,001	,934	37	,031

a. Corrección de la significación de Lilliefors

Pruebas de normalidad

TRATAMIENTOS		Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
		Estadístico	gl	Sig.	Estadístico	gl	Sig.
DENSIDAD APAREN	SUELO DESNUDO	.084	36	.200*	.965	36	.314
	COBERTURA VEGE	.096	36	.200*	.982	36	.814
POROSIDAD TOTAL	SUELO DESNUDO	.084	36	.200*	.965	36	.314
	COBERTURA VEGE	.096	36	.200*	.982	36	.814

*. Este es un límite inferior de la significación verdadera.

a. Corrección de la significación de Lilliefors